

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

Possibili fluttuazioni nel valore della
costante di decadimento dei radionuclidi:
studio per lo sviluppo di un esperimento
di misura a lungo termine

Relatore:
Prof. Giuseppe Baldazzi

Presentata da:
Eleonora Rossi

Correlatore:
Dott. Pier Luca Rossi

Sessione II
Anno Accademico 2014/2015

Abstract

Esperimenti condotti negli anni Ottanta per la determinazione della vita media di alcuni radioisotopi *sembrano* mostrare fluttuazioni anomale del valore delle costanti di decadimento. Negli anni a seguire, altri studi hanno tentato di spiegare l'origine delle fluttuazioni osservate in questi primi lavori. Insieme agli esperimenti che hanno mostrato anomalie, però, ve ne sono altri che non hanno registrato alcuna deviazione. Con il seguente elaborato si ha l'intento di ordinare e organizzare schematicamente gli articoli pubblicati finora e realizzare così un quadro della situazione attuale. Questo può essere utile per predisporre un esperimento, da svolgersi presso il Laboratorio di Fisica delle Radiazioni del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, che possa arricchire la casistica del fenomeno. Si affronta in conclusione la progettazione dell'esperimento a lungo termine, per il quale si prevede inizialmente una durata triennale delle osservazioni.

Indice

Introduzione	6
1 Posizione del problema	8
1.1 La legge del decadimento radioattivo	8
1.1.1 Decadimento α	11
1.1.2 Decadimento β	11
1.1.3 Decadimento γ	13
1.2 Principali caratteristiche di un rivelatore di radiazione[15]	15
1.3 Prime osservazioni sulla variabilità, storia	18
2 Classificazione delle osservazioni	22
2.1 Osservazioni decadimenti α	22
2.2 Osservazioni decadimenti β	25
2.3 Osservazioni decadimenti γ	28
2.4 Tabella riassuntiva	29
3 Discussione	30
3.1 Fenomeni correlati con decadimento γ, β, α	30
3.2 Principi fisici delle variazioni osservate	32
3.3 Implicazioni	33
4 Sviluppo di un apparato sperimentale per effettuare misure	35
4.1 Scelta del radioisotopo	35
4.2 Descrizione e schema dell'apparato sperimentale	40
4.3 Discussione	45
Conclusioni	46

Introduzione

La possibilità che i decadimenti radioattivi non siano avvenimenti casuali - e quindi che le costanti di decadimento di alcuni isotopi non siano in effetti costanti ma possano variare nel tempo - è stata ricercata sin dalla scoperta della radioattività. L'interesse per questa ipotesi si è accentuato da quando esperimenti condotti negli anni Ottanta per la determinazione della vita media di alcuni radioisotopi hanno mostrato dati anomali che *sembrano* scostarsi dalla classica legge esponenziale ritenuta ad oggi valida. Altri studi sono stati portati avanti per cercare eventuali riscontri con le prime osservazioni, in particolar modo per valutare l'influenza delle condizioni ambientali nelle quali si sono svolti gli esperimenti: temperatura, pressione, umidità ma anche presenza di eventi solari (o stellari) quali flares, tempeste, distanza Sole-Terra che possono aver falsato le misure oppure essere causa primaria delle deviazioni osservate.

L'intento di questo lavoro di Tesi è raccogliere ed organizzare schematicamente i risultati e le ipotesi sviluppate nei lavori pubblicati sino ad oggi al fine di realizzare un quadro della situazione attuale utile per predisporre un esperimento da allocarsi presso il Laboratorio di Fisica delle Radiazioni del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, che possa arricchire la casistica del fenomeno. L'ultimo capitolo di questo lavoro è dedicato alla progettazione dell'esperimento a lungo termine (inizialmente si prevede una durata triennale delle osservazioni).

L'elaborato che segue è suddiviso in quattro capitoli. Si introducono nel primo capitolo i decadimenti radioattivi da un punto di vista generale e teorico e si illustrano le caratteristiche principali di un rivelatore di radiazione. Il secondo e terzo capitolo si sviluppano sulla base degli articoli pubblicati sinora, allo scopo di mostrare e classificare i risultati degli esperimenti e le ipotesi più accreditate tra quelle discusse dagli autori sui fenomeni che potrebbero spiegare le fluttuazioni anomale osservate. I risultati sono organizzati schematicamente in base alla natura del decadimento che si osserva. Nel paragrafo 3.3 si illustrano le più importanti implicazioni che potrebbero derivare dalla eventuale conferma di tali anomalie: dalla necessità di correggere i risultati di datazioni effettuate con il ^{14}C (in quanto la curva di decadimento non seguirebbe più un andamento esponenziale semplice) ad altre eventualmente ancora più significative conseguenze, tra cui, per esempio, modificazioni temporali nel valore delle costanti universali.

Il quarto ed ultimo capitolo tratta tutto ciò che concerne lo sviluppo di un esperimento di misura per osservare eventuali fluttuazioni. Si discute la scelta del setup sperimentale, ovvero dei radioisotopi da utilizzare come sorgenti e della struttura dell'apparato sperimentale, con tutti gli accorgimenti che possono essere adottati

per rendere le misure più accurate, oltre alla scelta del tipo di rivelatore che possa realizzare un buon compromesso tra la stabilità nel corso del tempo di misura e la risoluzione energetica necessarie. Si discutono in conclusione le problematiche che possono presentarsi nella conduzione di un simile esperimento, con particolare riferimento alla lunga durata delle misure e alla necessità di un monitoraggio costante delle condizioni esterne nelle quali si svolge il lavoro oltre a quelle del campione, per poter escludere influenze ambientali sui dati.

Capitolo 1

Posizione del problema

In questo capitolo si richiamano i principali concetti riguardanti i decadimenti radioattivi e si citano le prime osservazioni di variabilità, che risalgono ad esperimenti condotti nei primi anni Ottanta.

1.1 La legge del decadimento radioattivo

I materiali radioattivi sono sostanze che emettono spontaneamente radiazione con una conseguente modificazione del nucleo. La scoperta della radioattività risale al 1896, anno in cui fu osservata per la prima volta da Becquerel, che scoprì l'esistenza di una radiazione penetrante studiando la fosforescenza di sali di uranio. In seguito a questa scoperta furono identificati tre tipi di radiazione di diversa natura: α , β , γ , ciascuna con diverso potere penetrante. Le diverse proprietà di queste radiazioni si possono studiare con un apparato sperimentale relativamente semplice il cui schema è rappresentato nella figura 1.1.

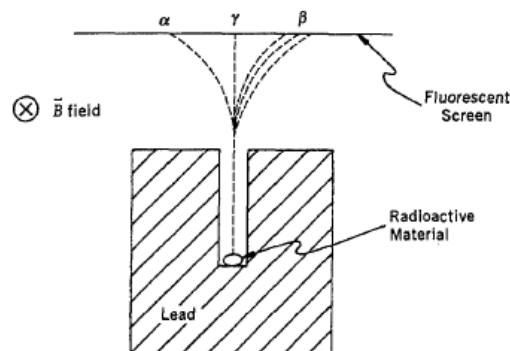


Figura 1.1: Schema dell'apparato sperimentale usato per studiare i tre tipi di radiazione

Poichè l'apparato è immerso in un campo magnetico, la direzione della deflessione dipende dalla carica e la sua entità dipende dalla quantità di moto delle particelle coinvolte. Le radiazioni α e β sono quindi di "segno" opposto, in particolare quest'ultima è di carica negativa. Le particelle del fascio α hanno energie molto simili tra loro, lasciano tracce sullo schermo molto ravvicinate. La stessa cosa non si può dire per il fascio di tipo β , che è caratterizzato invece da uno spettro continuo di emissione. I raggi γ : non subiscono alcuna deflessione lungo il loro percorso

verso lo schermo, da cui si deduce la loro carica neutra. Si comportano come radiazione elettromagnetica, difatti sono identificati come fotoni che viaggiano a velocità c ; sono inoltre molto più penetranti rispetto alle due radiazioni descritte in precedenza.

Veniamo ora alla descrizione della *legge del decadimento radioattivo*. Il rate di decadimento di una sostanza radioattiva pura decresce nel tempo secondo una legge esponenziale. Il decadimento è di natura statistica, ovvero non è possibile prevedere quando avverrà per il singolo atomo. La trattazione seguente quindi è tanto più accurata tanto più grande è il campione che si sta studiando.

Se al tempo t sono presenti N nuclei radioattivi e non vengono introdotti nel campione altri nuclei, abbiamo che:

$$\lambda = \frac{dN/dt}{N} \quad (1.1.0.1)$$

dove λ è detta *costante di decadimento*.

L'assunzione basilare che si fa nella teoria statistica del decadimento radioattivo è proprio l'indipendenza di questa costante, che rappresenta la probabilità di decadimento per unità di tempo, dall'età degli atomi. Integrando l'equazione 1.1.0.1 si ottiene la *legge esponenziale del decadimento radioattivo*:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1.0.2)$$

dove N_0 è il numero di nuclei presenti all'istante $t = 0$.

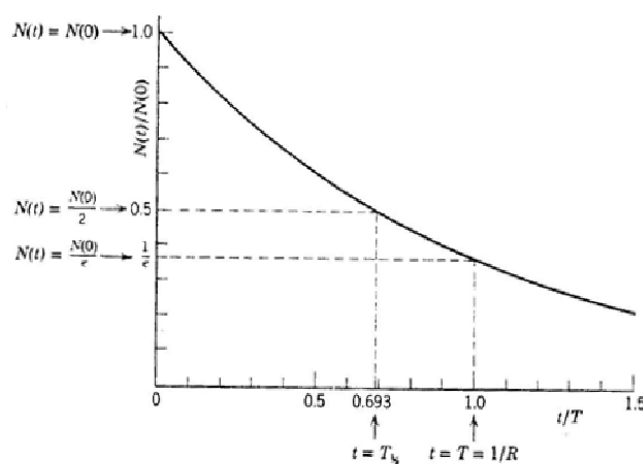


Figura 1.2: Legge esponenziale del decadimento radioattivo

Il *tempo di dimezzamento*, ovvero il tempo necessario affinché il numero di nuclei iniziali sia dimezzato è quindi dato da:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.1.0.3)$$

Talvolta è utile considerare la vita media, cioè il tempo medio di vita di un nucleo prima che decada:

$$\tau = \frac{\int t |dN/dt| dt}{\int |dN/dt| dt} \quad (1.1.0.4)$$

Si ha inoltre che

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1.1.0.5)$$

ovvero la vita media è l'inverso della costante di decadimento.

Generalmente si misura il numero di decadimenti che avvengono tra il tempo t_1 e il tempo t_2 . Quindi tra t e $t + \Delta t$ si ha

$$|\Delta N| = N(t) - N(t + \Delta t) = N_0 e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda \Delta t}) \quad (1.1.0.6)$$

Se $\Delta t \ll t_{1/2}$ espandendo il secondo esponenziale abbiamo:

$$|\Delta N| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \Delta t \quad (1.1.0.7)$$

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1.0.8)$$

Definiamo inoltre l' *attività* come il rate di decadimento in un campione:

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t}, \text{ con } A_0 = \lambda N_0 \quad (1.1.0.9)$$

Quindi l'attività non è altro che il numero di decadimenti per unità di tempo. È utile ma non ci fornisce informazioni sull'intensità della radiazione emessa o sulla sua energia.

Ci sono varie unità di misura per l'attività: le più usate sono il *curie* (Ci), definita come

$$1Ci = 3.710 \text{decadimenti}/s \quad (1.1.0.10)$$

e il *becquerel* (Bq), che è l'unità di misura nel SI e corrisponde a un decadimento per secondo.

1.1.1 Decadimento α

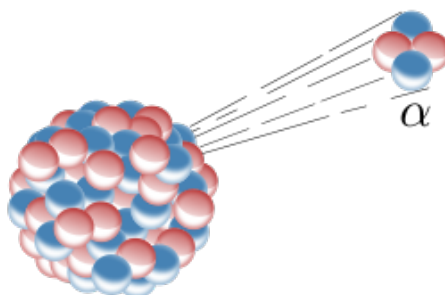


Figura 1.3: Decadimento alfa

In questo processo il nucleo emette una particella α (nucleo di elio) secondo l'equazione 1.1.1.1:

$${}^A_ZX_N \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X'_{N-2} + {}^4_2\text{He}_2 \quad (1.1.1.1)$$

dove X e X' sono rispettivamente il nucleo iniziale e il nucleo finale. Il numero totale di neutroni e protoni si conserva nel processo. Come conseguenza del decadimento si ha un cambiamento della specie chimica, poichè cambia il numero atomico, ma anche una variazione del numero di massa. Spesso il decadimento di tipo alfa è seguito da emissione di fotoni gamma per la diseccitazione del nuovo nucleo.

Lo spettro delle particelle emesse in questo caso è uno spettro discreto, l'energia liberata nel processo viene infatti trasferita alla particella α .

Generalmente questo tipo di decadimento avviene nel caso di nuclei molto pesanti, un esempio può essere dato da:

$${}^{226}_{88}\text{Ra}_{138} \longrightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn}_{136} + {}^4_2\text{He}_2 \quad (1.1.1.2)$$

1.1.2 Decadimento β

Decadimento β^-

In questo tipo di decadimento sono emesse particelle di carica negativa. In particolare il nucleo emette un elettrone come rappresentato schematicamente nell'equazione 1.1.2.1:

$${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z+1}X + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.1.2.1)$$

Si modifica la specie chimica, infatti varia il numero atomico mentre resta invariato il numero di massa, ovvero c'è sempre lo stesso numero di nucleoni nei due atomi.

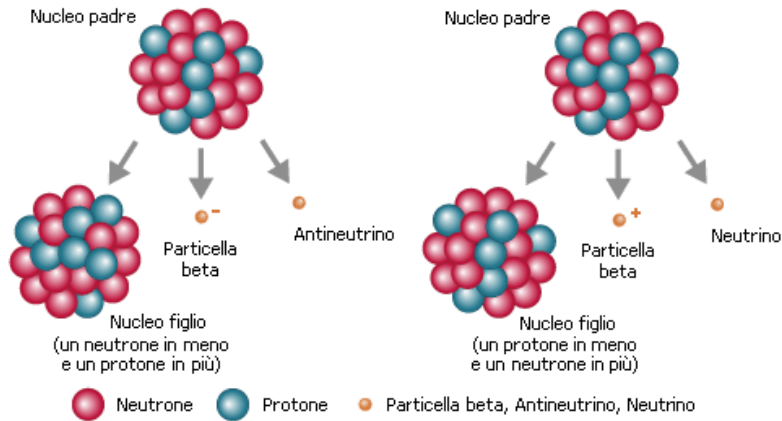


Figura 1.4: Decadimento beta

Lo spettro di emissione beta è uno spettro continuo come rappresentato in figura 1.5:

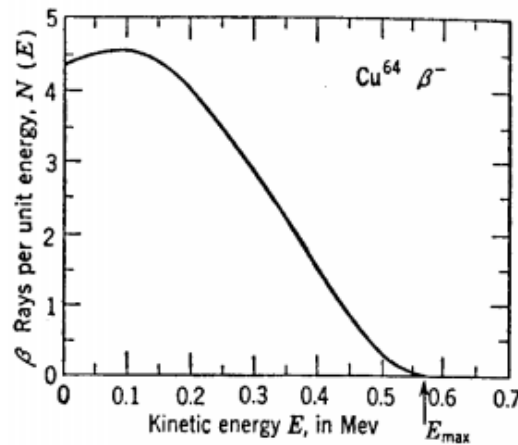


Figura 1.5: Spettro del decadimento β^- del ^{64}Cu

Questo si spiega solamente se il processo è un processo a tre corpi, ovvero se l'emissione dell'elettrone è accompagnata dall'emissione di una seconda particella, un antineutrino. La ragione risiede nel fatto che se tutta l'energia liberata nel processo fosse trasferita all'elettrone, lo spettro sarebbe discreto. In alcuni casi, quando non si ha un decadimento beta "puro", si osserva anche l'emissione di uno o più fotoni gamma. Ciò è dovuto al fatto che in questo tipo di decadimenti l'emissione dell'elettrone lascia il nucleo in uno stato eccitato, per cui successivamente si diseccita emettendo fotoni gamma. In questo caso lo spettro dei fotoni gamma è uno spettro discreto.

Decadimento β^+

Esiste un ulteriore tipo di decadimento beta, denominato β^+ , che avviene con emissione di un positrone e si può immaginare come la trasformazione di un protone in neutrone e positrone.



Lo spettro è simile a quello del decadimento con emissione di elettrone. Anche in questo caso la continuità è spiegata dall'emissione di un neutrino, che rende il processo un processo a tre corpi.

Cattura elettronica

La cattura elettronica è infine un processo per certi versi simile al decadimento β^+ : uno degli elettroni appartenente agli orbitali più interni e vicini al nucleo viene catturato dal nucleo dando luogo alla formazione di un neutrone per combinazione con un protone.

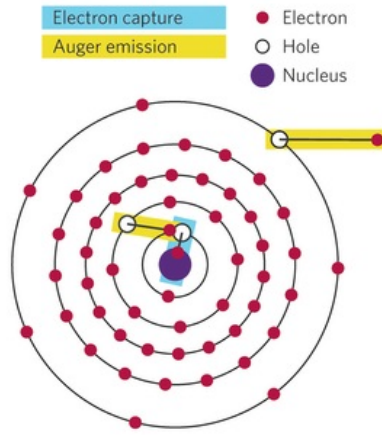
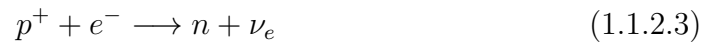


Figura 1.6: Cattura elettronica



Questo fenomeno si può studiare osservando l'emissione di raggi X: la lacuna che si forma a seguito della cattura elettronica viene riempita da un altro elettrone appartenente ad un orbitale più esterno che si diseccita emettendo raggi X.

1.1.3 Decadimento γ

Il decadimento di tipo gamma avviene quando uno stato eccitato decade in uno stato eccitato di minore energia o nello stato fondamentale. Viene emesso così un fotone γ con energia uguale alla differenza di energia tra i due livelli. Generalmente questo tipo di decadimento si osserva in concomitanza con decadimenti di altro tipo (α , β) che portano l'atomo prodotto del decadimento in uno stato eccitato, perciò l'atomo figlio si diseccita emettendo uno o più fotoni. I decadimenti di tipo gamma hanno tempi di dimezzamento relativamente brevi. Queste transizioni sono dette anche *transizioni isomeriche* e gli elementi che decadono in questo modo sono chiamati anche metastabili.

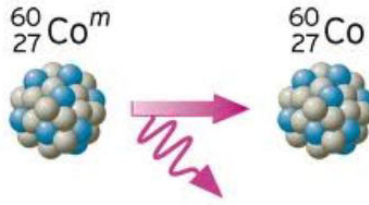


Figura 1.7: Decadimento γ

Un processo in cui è coinvolto questo tipo di decadimento è il processo di *conversione interna*, che ha luogo quando il nucleo si diseccita trasferendo l'energia liberata ad un elettrone dell'atomo. Quest'ultimo, così, acquista energia sufficiente per fuoriuscire dall'atomo e diventare un elettrone libero ad alta energia. Questo tipo di processo è di natura diversa rispetto al decadimento beta visto in precedenza: è un decadimento a due corpi (lo spettro di fatti è discreto e non continuo) poichè non vi è emissione di neutrini, inoltre la struttura del nucleo resta invariata.

1.2 Principali caratteristiche di un rivelatore di radiazione[15]

Il funzionamento di un rivelatore di radiazione consiste essenzialmente di due fasi: il fotone incidente che raggiunge la superficie dello strumento trasferisce energia alla massa del rivelatore, in seguito il rivelatore trasforma questa energia in un segnale fisico, generalmente un impulso elettrico, che possa essere facilmente misurato.

Esistono svariati tipi di rivelatori che si distinguono in base al tipo di segnale in cui convertono l'energia dei fotoni incidenti, di conseguenza hanno strutture molto diverse tra loro. In questa sezione ci si sofferma solamente sulle caratteristiche generali che accomunano tutti questi tipi di strumenti. Definiamo una serie di

parametri che risultano essere molto utili nella scelta del tipo di rivelatore da utilizzare in base al tipo di misura che si deve fare. Introduciamo innanzitutto la

risposta del rivelatore:

$$R = \frac{S}{G} \quad (1.2.0.1)$$

dove S indica il segnale che il rivelatore produce in uscita e G è ciò che si vuole misurare. Generalmente è rara la situazione in cui il segnale in uscita è proporzionale al segnale in entrata, questo può accadere a volte per certi valori di G.

La *modalità operativa* del rivelatore, riguarda con quale criterio il rivelatore restituisce un segnale in uscita. Ci sono tre possibilità:

- *Continuous mode* : si ha un segnale in uscita che dipende dall'intensità della fluensa energetica della radiazione.
- *Photon counting mode* : il segnale è dato da un numero di impulsi che dipende dal numero di fotoni incidenti.
- *Pulse height mode* : il segnale è dato da impulsi e ognuno di questi è dotato di un'ampiezza proporzionale all'energia del fotone che lo ha generato.

Il *counting rate*, definito per gli ultimi due tipi di modalità operativa, dice il numero medio di eventi registrati nell'unità di tempo.

Il minimo valore di G per il quale il rivelatore produce un segnale è la *sensibilità del rivelatore*. Vari fattori concorrono a determinare questo valore:

- Sezione d'urto per ionizzazione del materiale del rivelatore
- Massa del rivelatore
- Rumore intrinseco del rivelatore
- Materiale che circonda e/o riveste il rivelatore

I primi due fattori sono rilevanti in quanto determinano la probabilità che la radiazione incidente converta la sua energia in forma di ionizzazione. Il segnale da qui prodotto deve essere più grande del rumore dovuto all'elettronica legata al rivelatore e al rivelatore stesso in maniera tale che si possa estrarre il segnale, anche per mezzo di filtri eventualmente. È importante anche considerare il fatto che i fotoni devono avere abbastanza energia da oltrepassare lo strato più esterno del rivelatore e raggiungere la parte sensibile.

Passiamo ora alla definizione di *efficienza del rivelatore*, che può essere di due tipi:

· Assoluta

$$\epsilon_{assoluta} = \frac{\text{eventi registrati}}{\text{eventi generati dalla sorgente}} \quad (1.2.0.2)$$

· Intrinseca

$$\epsilon_{intrinseca} = \frac{\text{eventi registrati}}{\text{eventi incidenti sul rivelatore}} \quad (1.2.0.3)$$

Se la sorgente è isotropica queste due grandezze sono legate dalla relazione:

$$\epsilon_{intrinseca} = \frac{4\pi}{\Omega} \epsilon_{assoluta} \quad (1.2.0.4)$$

dove Ω è l'angolo solido attraverso il quale la sorgente è vista dal rivelatore.

Detto $\epsilon_{geometrica} = \frac{\Omega}{4\pi}$ un termine che chiamiamo *efficienza geometrica*, abbiamo che:

$$\epsilon_{assoluta} = \epsilon_{geometrica} \cdot \epsilon_{intrinseca} \quad (1.2.0.5)$$

La probabilità che un fotone sia emesso nell'intorno di un angolo ϑ è data da:

$$P(\theta)d\Omega = \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (1.2.0.6)$$

Detto λ il libero cammino medio per una interazione e dato che la probabilità di interazione del fotone lungo il cammino x all'interno del rivelatore è:

$$p(x) = 1 - e^{-\frac{1}{\lambda}x} \quad (1.2.0.7)$$

si ha che

$$d\epsilon_{assoluta} = 1 - e^{-\frac{1}{\lambda}x} \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (1.2.0.8)$$

che integrata sul volume del rivelatore dà l'efficienza assoluta.

Un'altra caratteristica importante è il *tempo di risposta* del rivelatore. Indica quanto tempo passa tra l'arrivo del fotone sulla superficie del rivelatore e la formazione di un segnale.

Infine il *tempo morto* o *dead time*: il tempo impiegato dal rivelatore per processare un evento. Questo è importante perchè durante questa fase il rivelatore potrebbe non essere sensibile ad ulteriori eventi che andrebbero quindi persi. L'idea è quindi quella di utilizzare un impulso molto breve in modo tale da minimizzare

la probabilità che un secondo evento si verifichi durante il dead time andando probabilmente perso.

I rivelatori si distinguono in due categorie in base al loro comportamento relativamente al tempo morto: ci sono rivelatori *paralizzabili* e *non paralizzabili*. In particolare ci si riferisce al primo caso quando il tempo morto del rivelatore viene prolungato dalla misura successiva di più eventi, ovvero se un evento misurato durante un dead time contribuisce esso stesso a prolungare il dead time. Questo può "paralizzare" il rivelatore nel senso che se si registrano tanti eventi con frequenza elevata può succedere che non si misuri nulla per un periodo prolungato di tempo. Il secondo tipo di rivelatore invece si comporta in modo tale da semplicemente ignorare il fotone incidente durante il dead time e in questo modo si perde una quantità di informazione molto più piccola perchè il dead time non viene prolungato.

Nei due casi possiamo risalire al numero vero di eventi a partire dal numero di eventi effettivamente conteggiati e dal dead time τ .

Per un rivelatore non paralizzabile, detto m il vero count rate e k il numero di conteggi registrato dal rivelatore, abbiamo che il tempo morto totale (considerando τ costante) è dato da:

$$\Delta = k\tau \quad (1.2.0.9)$$

Gli eventi veri non conteggiati sono quindi $mk\tau$ durante il tempo Δ .

Dunque si ha che:

$$mT = k + mk\tau \quad (1.2.0.10)$$

da cui

$$m = \frac{\frac{k}{T}}{1 - \frac{k}{T}\tau} \quad (1.2.0.11)$$

Nel caso di un rivelatore paralizzabile, sempre con τ costante ed esposto ad una sorgente random si ha che la distribuzione degli intervalli di tempo tra gli eventi è data da:

$$P(t) = me^{-mt} \quad (1.2.0.12)$$

La probabilità che sia $t > \tau$ è

$$P(t > \tau) = m \int_{\tau}^{\infty} e^{-mt} dt = e^{-m\tau} \quad (1.2.0.13)$$

Gli eventi osservati in un tempo T sono dati dalla frazione di eventi reali mT in cui $t > \tau$, e cioè

$$k = mT e^{-m\tau} \quad (1.2.0.14)$$

Per trovare m si risolve numericamente l'equazione 1.2.0.14.

1.3 Prime osservazioni sulla variabilità, storia

Le prime osservazioni sulla variabilità della costante di decadimento dei radionuclidi risalgono agli anni Ottanta, periodo in cui esperimenti a lungo termine furono condotti da due gruppi indipendenti presso il Brookhaven National Laboratory (BNL) [3] e il Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) [31].

Il primo gruppo si proponeva di misurare la vita media del ^{32}Si . L'esperimento, avviato nel mese di Febbraio 1982, si protrasse per quattro anni consecutivi. L'idea era quella di registrare i conteggi del silicio usando come riferimento il ^{36}Cl , che ha una vita media piuttosto lunga ($T(1/2) = 301000\text{yr}$), tale per cui, ai fini dell'esperimento, il suo rate di decadimento può essere considerato costante [17]. Si osservano in questa sede piccole deviazioni annuali dei dati rispetto a una curva esponenziale di decadimento. Questo non portò a effetti significativi sul risultato finale, nonostante le periodiche deviazioni fossero di origine incerta.

Il secondo gruppo si occupava invece di misurare la vita media del ^{152}Eu , dove il ^{226}Ra era utilizzato come isotopo di confronto a vita media molto lunga. Questo esperimento durò molto a lungo, quindici anni consecutivi, e per due anni si sovrappose a BNL. Anche in questo caso si osservarono fluttuazioni periodiche con periodicità annuale.

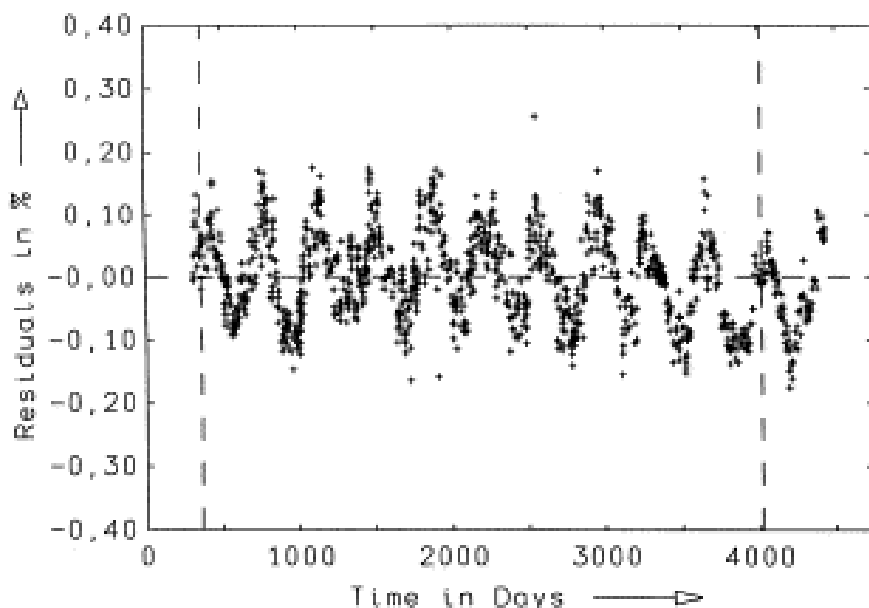


Figura 1.8: Dati dalla camera di ionizzazione per il ^{226}Ra in funzione del tempo. [31]

Ogni punto del grafico riportato in figura 1.8 è in realtà una media su circa una trentina di misurazioni e le due linee verticali indicano un intervallo di dieci anni. Si può osservare la periodicità annuale delle oscillazioni.

Svariati articoli sono stati pubblicati più di recente a partire dai dati raccolti da questi due esperimenti. Lo scopo di uno di questi lavori è, ad esempio, stimare la sensibilità dei rivelatori utilizzati, in modo tale da stabilire se le oscillazioni osservate possono essere ricondotte a variazioni stagionali nella temperatura, umidità,

radiazione di fondo e altri fattori [19]. Questo aspetto è maggiormente approfondito nel capitolo 3.

A titolo di esempio si riporta nella figura 1.9 il grafico mostrato nell'articolo pubblicato nel 2010 in seguito a queste misure: la variazione di temperatura stagionale misurata durante il periodo di acquisizione dei dati nei pressi del laboratorio risulta anticorrelata rispetto alle oscillazioni osservate della costante di decadimento.

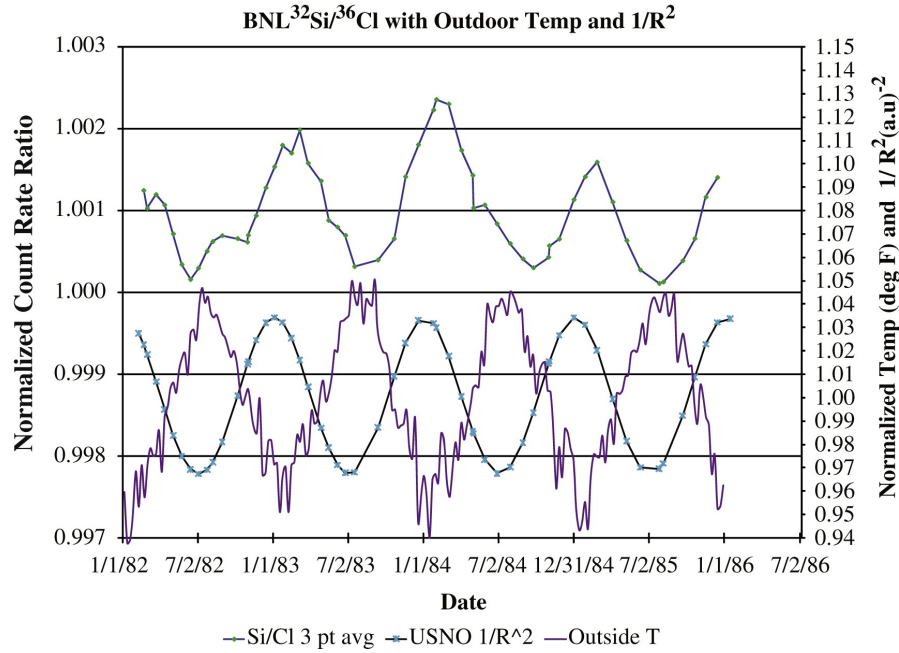


Figura 1.9: Anticorrelazione delle oscillazioni con le variazioni di temperatura stagionali misurate nei pressi di BNL [19]

Molti degli articoli pubblicati in seguito a questi due lavori si propongono invece di suggerire possibili correlazioni di altra natura; tra le ipotesi esposte, spicca in particolare la possibile correlazione con la variazione stagionale della distanza Terra-Sole, come esposto in [17]. Anche questo aspetto è meglio esposto nel capitolo 3.

Di seguito i grafici tratti dall'articolo originale (figura 1.10, 1.11, 1.12) che mostrano la sovrapposizione delle due serie di dati e dai quali si evince una possibile correlazione.

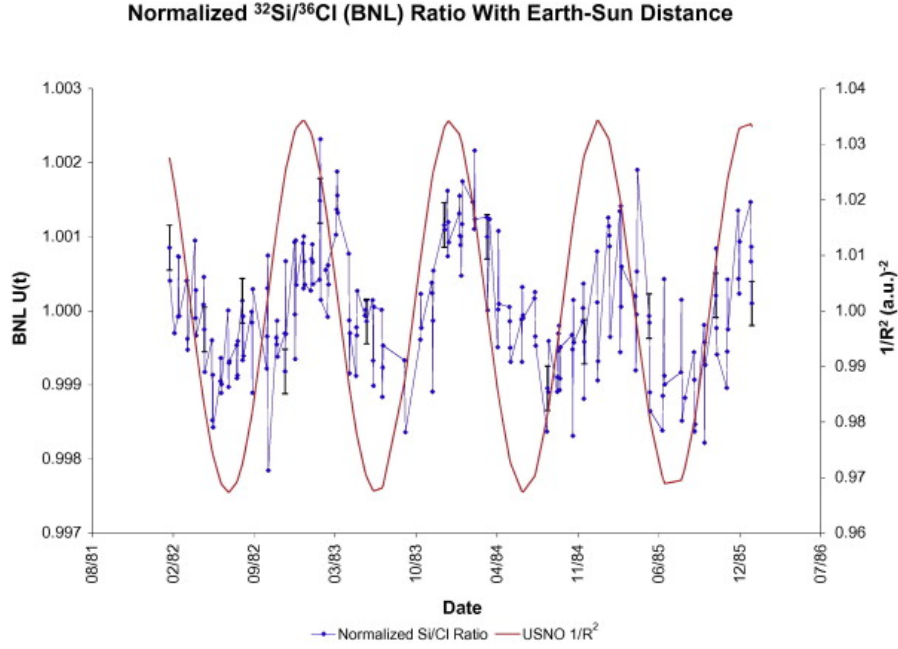


Figura 1.10: Oscillazioni osservate in esperimento BNL e andamento della distanza Terra-Sole [17]

Il coefficiente di correlazione per questi dati è $r = 0.52$.

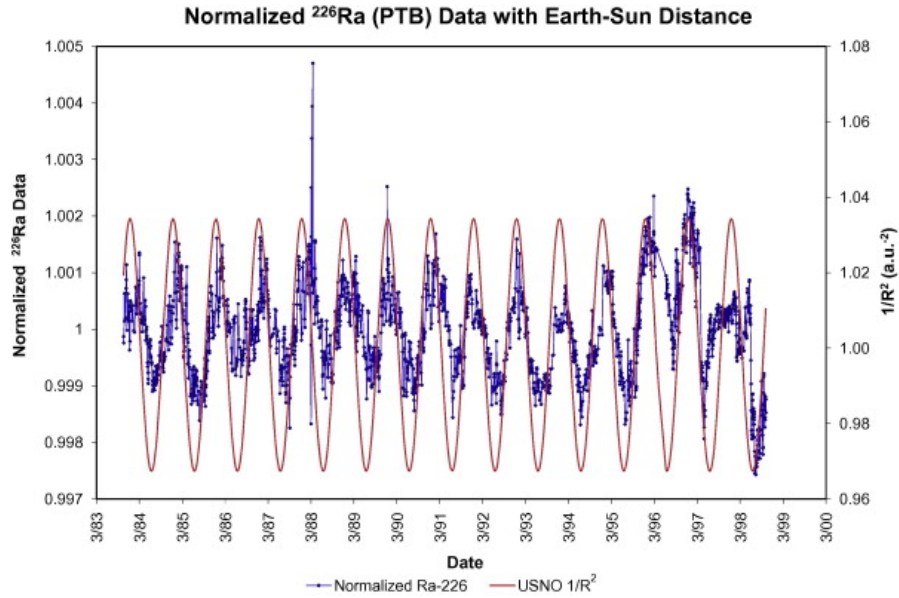


Figura 1.11: Oscillazioni osservate in esperimento PTB e andamento della distanza Terra-Sole [17]

Il coefficiente di correlazione per questi dati è $r = 0.62$.

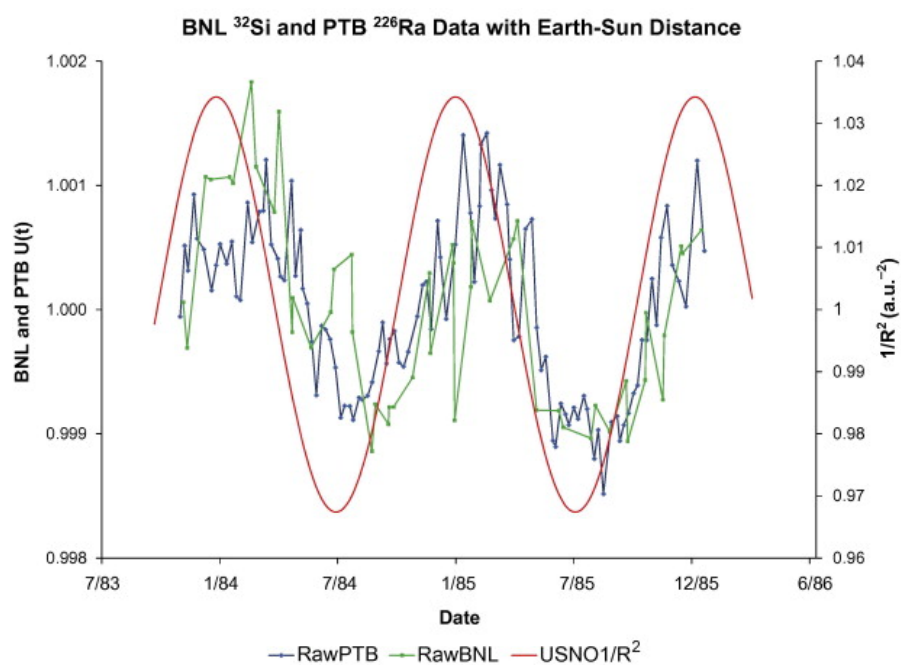


Figura 1.12: Dati esperimento BNL e PTB e andamento della distanza Terra-Sole [17]

Capitolo 2

Classificazione delle osservazioni

In seguito ai primi esperimenti degli anni '80 numerosi studi sono stati portati avanti sia con risultati che sembrano confermare le prime osservazioni, sia con esiti opposti. In questo capitolo si illustrano le principali osservazioni, favorevoli e contrarie, con la scelta di catalogarle in base alla natura del decadimento e non alla radiazione effettivamente misurata. La non corrispondenza delle due indicata eventualmente nella tabella 2.1.

2.1 Osservazioni decadimenti α

Le osservazioni riguardanti i decadimenti di tipo α sono probabilmente quelle più controverse. Uno dei primi elementi studiati è il ^{226}Ra , presso PTB, [31], come richiamato nella sezione 1.3. In questo caso era stata osservata un'oscillazione di frequenza annuale nella costante di decadimento su una misurazione di una decina di anni. In seguito sono state effettuate ulteriori misure con emettitori α simili per cercare di confermare o smentire l'effetto osservato. Sono stati raccolti a proposito i dati provenienti dalla sonda Cassini, alimentata da tre unità RTG (generatori termoelettrici a radioisotopo) dove il radioisotopo in questione è il ^{238}Pu [9]. La traiettoria della sonda si trova tra Venere e Saturno, i risultati ottenuti escludono una variazione della costante di decadimento e, a maggior ragione, una possibile correlazione di questa variazione con la distanza Terra-Sole, almeno per quanto riguarda le distanze comprese tra Venere e Saturno. La misura della costante di decadimento è stata fatta indirettamente, registrando i dati sulla potenza di un RTG, la quale risulta proporzionale alla costante di decadimento del radioisotopo che genera il calore secondo la legge riportata in [9].

L'idea di eseguire delle misure a questi scopi su una sonda ad una distanza dal Sole R variabile era già stata suggerita in [17], in seguito all'ipotesi secondo la quale le osservazioni possono essere legate alla distanza della Terra dal Sole.

Altri dati sono stati raccolti nel tentativo di verificare o meno una possibile correlazione delle variazioni osservate con i *solar flares* (vedi Capitolo 3).

Il gruppo di Bellotti e altri, si propone di studiare il decadimento del $^{\text{nat}}\text{Th}$ durante un periodo di intensa attività solare corrispondente ad Agosto 2011.

I risultati sono mostrati nella figura 2.2: il Torio è rappresentato dalla seconda serie di dati, raccolti con una acquisizione al giorno.

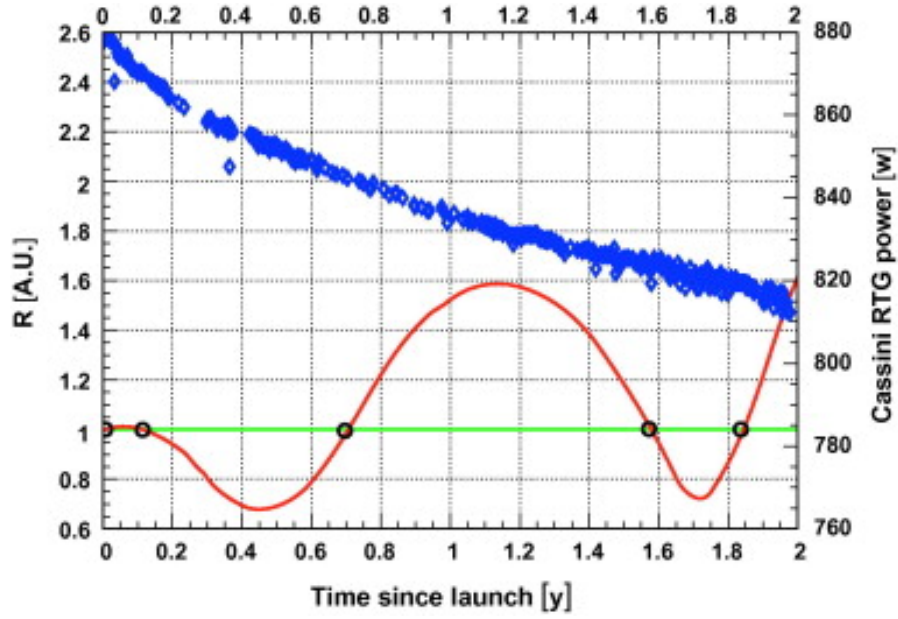


Figura 2.1: Distanza dal Sole (curva rossa) e potenza di RTG (rombi blu) [9]

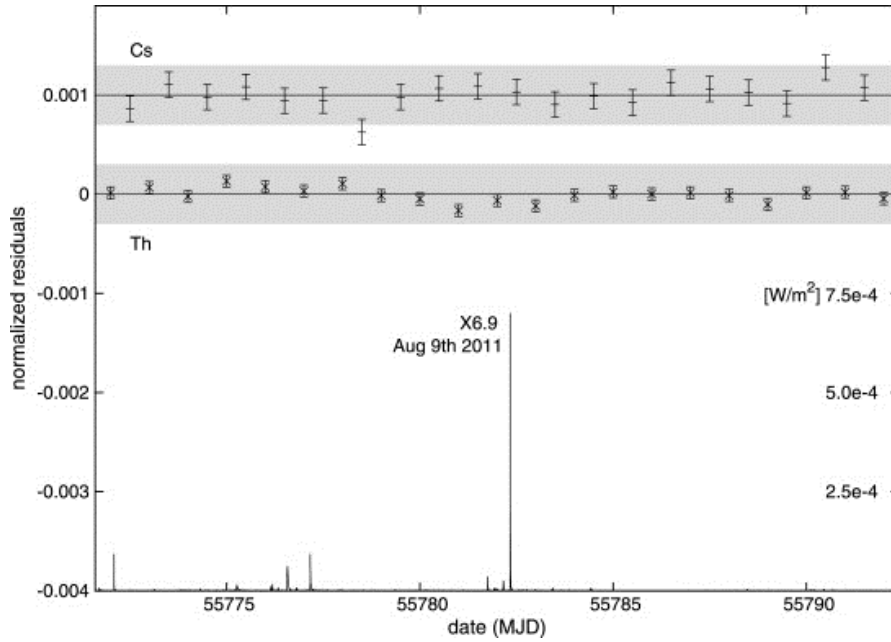


Figura 2.2: Risultati per il ^{nat}Th e il ^{137}Cs . In basso il flusso di raggi X proveniente dal Sole misurato dal satellite GOES-15 [7]

In concomitanza con il flare solare si nota un'oscillazione effettivamente discutibile, che per gli autori dell'articolo interpretano come fluttuazione statistica, poichè risulta essere dello stesso ordine di grandezza di altre fluttuazioni osservate in periodi diversi. Si tratta comunque di effetti molto piccoli considerati non rilevanti al di là di possibili correlazioni con l'attività solare.

Un risultato analogo è stato riscontrato in seguito dallo stesso gruppo, nel maggio 2013, in concomitanza con un altro flare solare. Il radioisotopo utilizzato in questo caso è il ^{232}Th [8].

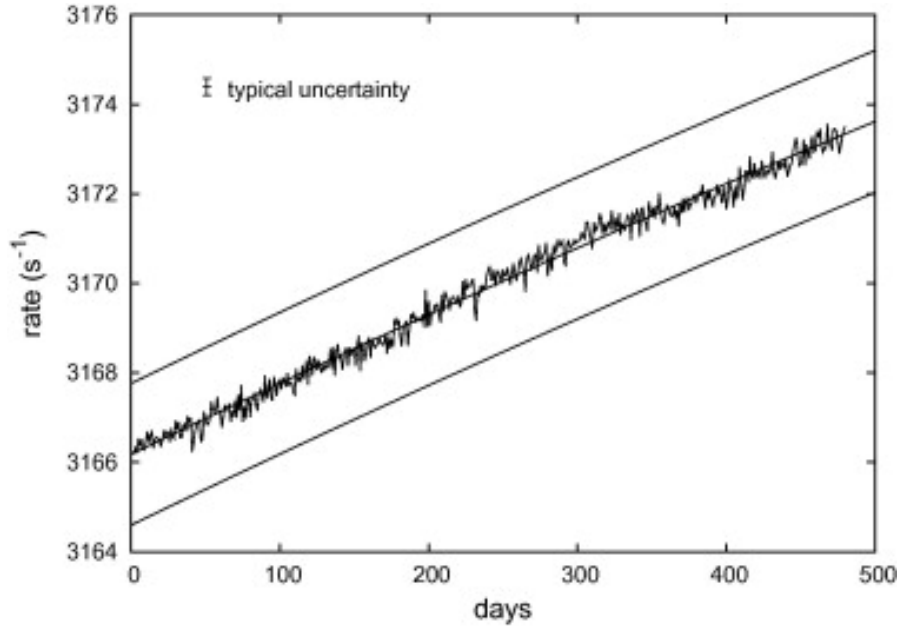


Figura 2.3: Risultati per il ^{232}Th . Le misure sono mediate su un giorno di acquisizione e le due linee si trovano rispettivamente a $\pm 5 \cdot 10^4$ [8]

Un gruppo indipendente, effettua misurazioni durante il periodo nel quale sono state osservate le fluttuazioni in [16]. Il radioisotopo oggetto di misure è il ^{239}Pu . In concomitanza con la diminuzione di conteggi registrata per il ^{54}Mn però non si osservano fluttuazioni più grandi di due deviazioni standard rispetto alla media.

Un'ultima osservazione che, anche questa volta, si trova in disaccordo con la possibilità che ci siano fluttuazioni, si trova in un articolo di Norman e altri [24]. Queste misure sono state ripetute in seguito ma hanno portato alle stesse conclusioni.

Per i decadimenti di tipo α non sono state finora osservate fluttuazioni significative.

2.2 Osservazioni decadimenti β

Le osservazioni sui decadimenti β sono probabilmente quelle più numerose. In questa sezione si citano i principali risultati.

Le osservazioni sul ^{36}Cl riportate nella sezione 1.4 sono state seguite da altri esperimenti sullo stesso elemento per, eventualmente, avere ulteriori prove sperimentali a conferma di quanto osservato. I risultati di due gruppi indipendenti sono però discordanti tra loro. Il primo gruppo effettua misure per un periodo di sette anni consecutivi e i dati sono ottenuti da una routine settimanale di calibrazioni di uno strumento utilizzato per la sicurezza in ambito radiologico. Nella figura 2.4, tratta dall'articolo originale [18], sono riportati in un grafico i risultati dell'esperimento comprensivi del background.

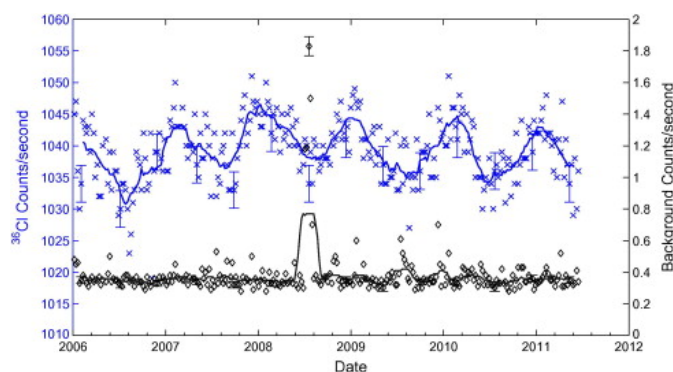


Figura 2.4: Confronto dei dati derivanti dalle misure di fondo e dai conteggi per il ^{36}Cl , dati dell'esperimento [18] da gennaio 2006 a giugno 2011

Nonostante la minor accuratezza delle misure rispetto a BNL si può osservare un andamento oscillante con periodicità più o meno annuale.

Sempre misure effettuate sul ^{36}Cl da un altro gruppo (ottenute con un metodo di misura diverso) danno risultati in disaccordo con quelli appena descritti. Le fluttuazioni sono più piccole di oltre un ordine di grandezza e non si identificano oscillazioni. Inoltre, le misure effettuate dal secondo gruppo si sovrappongono temporalmente a quelle effettuate dal primo, in particolare la durata di questo secondo esperimento è di circa quattro anni, a partire dal 2009.

Nella figura 2.5 è rappresentato il grafico che mette a confronto i risultati dei tre esperimenti citati in questa sezione riguardo il ^{36}Cl .

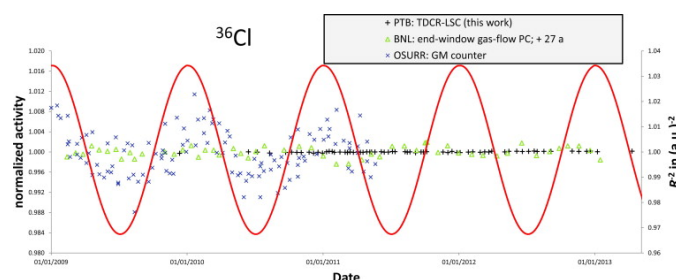
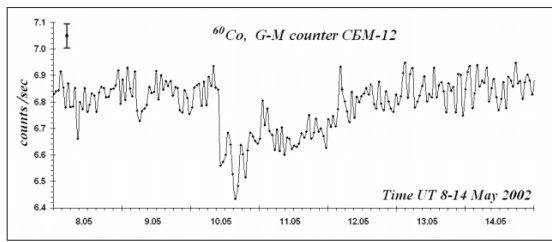
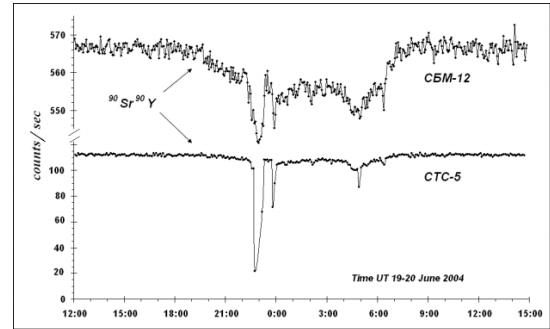


Figura 2.5: Risultati a confronto degli esperimenti [3], [18], [20]

Fluttuazioni sul decadimento di ^{60}Co , ^{90}Sr ^{90}Y sono state osservate da Parkhomov [28] in un esperimento di lunga durata (più di tredici anni). Un'analisi sulla variazione delle condizioni esterne nelle quali l'esperimento è stato svolto (temperatura, pressione ecc) può escludere che le oscillazioni osservate possano essere di natura ambientale. Lo stesso Parkhomov in un articolo successivo [27] cerca una possibile variazione nelle costanti di decadimento degli stessi elementi in concomitanza con periodi di intensa attività solare. Nessuna osservazione è stata registrata durante questi eventi, ma alcune deviazioni sono state misurate nel maggio 2002 per il ^{60}Co e nel giugno 2004 per il ^{90}Sr ^{90}Y lontane dai periodi di maggiore attività solare.



(a) Deviazione nei conteggi per il ^{60}Co nel Maggio 2002 [27]



(b) Deviazione nei conteggi per il ^{90}Sr ^{90}Y nel Giugno 2004 [27]

Figura 2.6: Deviazioni misurate durante un periodo di regolare attività solare

L'idea di ricercare eventuali correlazioni delle deviazioni dalla costante di decadimento con i flares solari è nata in seguito ad un articolo di Jenkins e Fischbach [16] nel quale gli autori mostrano una diminuzione nel decay rate del ^{54}Mn in concomitanza con un flare solare registrato il 13 dicembre 2006.

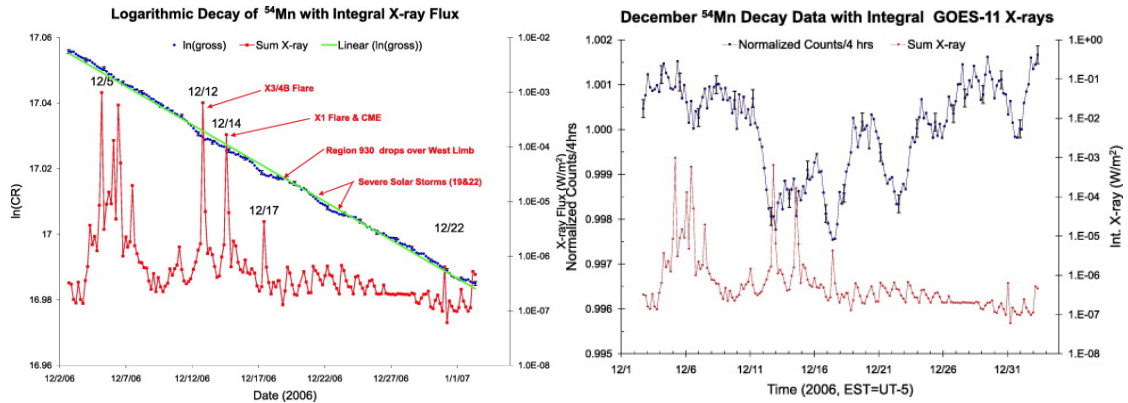
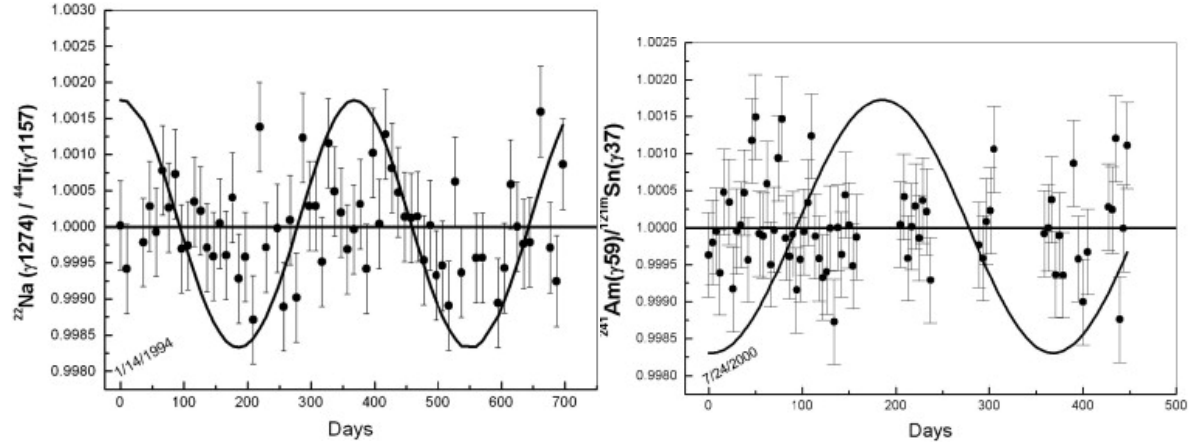


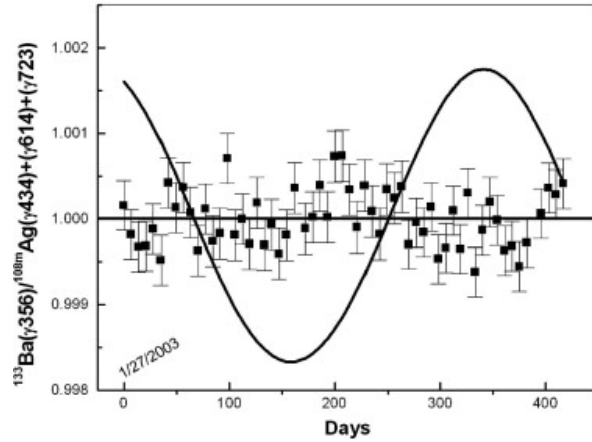
Figura 2.7: Diminuzione del count rate del ^{54}Mn durante il flare solare di dicembre 2006 [16].

Ulteriori esperimenti sono mirati, oltre che a cercare possibili fluttuazioni per radioisotopi non ancora studiati, anche a verificare eventualmente risultati ottenuti da altri gruppi precedentemente. Questo è il caso di [25] e [29], dove è prevista

l'acquisizione dei raggi gamma derivanti dai decadimenti (principalmente cattura elettronica) e l'idea è quella di eseguire le misure per un campione formato da un insieme di radioisotopi diversi (^{22}Na , ^{44}Ti , $^{108}\text{Ag}^m$, $^{121}\text{Sn}^m$, ^{133}Ba , ^{241}Am), in modo tale da evidenziare, eventualmente, un andamento periodico della costante di decadimento che non dipenda dagli strumenti di misura, poichè gli eventuali effetti sistematici dovuti alla strumentazione sarebbero così cancellati.



(a) Coefficiente di correlazione di Pearson $r = 0.9999$ per l'ipotesi di nessuna variazione annuale e $r = 0.3389$ per l'ipotesi di Jenkins [25]
(b) Coefficiente di correlazione di Pearson $r = 0.9994$ per l'ipotesi di nessuna variazione annuale e $r = 0.0051$ per l'ipotesi di Jenkins [25]



(c) Coefficiente di correlazione di Pearson $r = 0.999$ per l'ipotesi di nessuna variazione annuale e $r = 0.295$ per l'ipotesi di Jenkins [25]

Figura 2.8: Risultati dei tre esperimenti. La linea con andamento sinusoidale rappresenta l'andamento ipotizzato da Jenkins [17], la linea retta rappresenta invece la media dei dati [25]

Per concludere sulle osservazioni riguardanti i decadimenti β si cita un lavoro di Bellotti e altri [7] che riguarda lo studio delle costanti di decadimento del ^{40}K e del ^{137}Cs .

La deviazione sulla costante di decadimento è qui minore di $3 \cdot 10^{-4}$ in concomitanza con il picco del flusso di raggi X dovuto al flare solare.

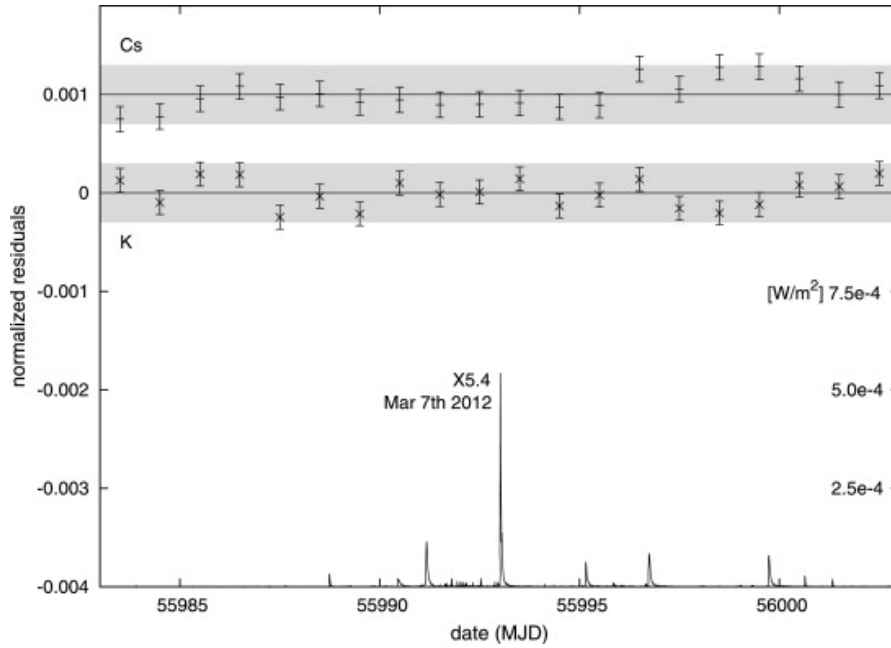


Figura 2.9: Risultati mediati su un giorno di misure e flusso di raggi X misurato dal satellite GOES-15 [7]

Lo stesso gruppo due anni dopo pubblica un lavoro con l'obiettivo di trovare possibili deviazioni nella costante del ^{40}K , indipendentemente da possibili correlazioni [8]. La modulazione misurata è di $4.5 \pm 0.8 \cdot 10^{-5}$. Una possibile influenza esterna può essere apportata dal flusso di raggi cosmici, ad ogni modo gli autori escludono una deviazione di periodo inferiore a un anno dell'entità di $2.6 \cdot 10^{-5}$.

2.3 Osservazioni decadimenti γ

Tutt'ora non sono state registrate osservazioni sui decadimenti di natura gamma, uno dei motivi è il tempo di dimezzamento molto breve per questi radionuclidi [26]. Accade spesso però che le misure per gli altri tipi di decadimento riguardino in realtà dei gamma derivanti dalla catena di decadimento alfa o beta.

2.4 Tabella riassuntiva

Tabella 2.1: Principali osservazioni

Tipo decadimento	Elemento	Ref.	Strumento	Risultati
α	^{238}Pu	[9]	Dati dal generatore della sonda Cassini	Nessuna deviazione significativa
α, β	$^{226}\text{Ra}^*$	[31]	Camera di ionizzazione	Nessuna deviazione significativa
α	$^{\text{nat}}\text{Th}$	[7]	Cristallo NaI	Nessuna deviazione significativa
α	^{232}Th	[8]	Cristallo NaI	Nessuna deviazione significativa
α	^{239}Pu	[27]	Semiconduttore (Si)	Nessuna deviazione significativa
α	^{241}Am	[25]	Rivelatore al Ge	Nessuna deviazione significativa
β^-	^{32}Si	[3]	Contatore proporzionale	Deviazioni annuali 0.12 %
β^-	^{36}Cl	[18] [20]	Geiger-Muller Scintillatore liquido	Deviazioni annuali Nessuna deviazione
β^-	^3H	[13] [34]	Fotodiodi Scintillatore liquido	Deviazioni annuali Deviazioni su 12.5y^{-1}
β^-	^{60}Co	[28] [27]	Geiger-Muller Geiger-Muller	Deviazioni annuali 0.3% Deviazione massima 0.15%
β^-	$^{85}\text{Kr}^*$	[30]	Camera ionizzazione	Deviazioni annuali
β^-	^{90}Sr ^{90}Y	[28] [27]	Geiger-Muller Geiger-Muller	Deviazioni annuali 0.3% Deviazione massima 0.051%
β^-	^{137}Cs	[6] [7]	Semiconduttore (HPGe)	Nessuna deviazione $> 8.5 \cdot 10^{-5}$ Nessuna deviazione
CE	$^{54}\text{Mn}^*$	[16]	Scintillatore	Diminuzione del decay rate su breve periodo
CE	^{40}K	[7] [8]	Cristallo NaI Cristallo NaI	Deviazioni $< 3 \cdot 10^{-4}$ Deviazioni $< 3 \cdot 10^{-4}$
CE	$^{44}\text{Ti}^*$ $^{108}\text{Ag}^{\text{m}*}$ $^{133}\text{Ba}^*$	[25]	Semiconduttore (Ge)	2.8c
$\beta^+ + \text{EC}$ EC	$^{22}\text{Na}^*$ $^{44}\text{Ti}^*$	[25]	HPGe	2.8a
β^- α	$^{121}\text{Sn}^{\text{m}}$ ^{241}Am	[25]	Semiconduttore (Ge)	2.8b

*I radioisotopi contrassegnati con un asterisco sono quelli per cui la misura effettuata riguarda un fotone gamma derivante dalla catena di decadimento del radioisotopo in oggetto.

Capitolo 3

Discussione

3.1 Fenomeni correlati con decadimento γ , β , α

In seguito alle prime osservazioni sulla variabilità della costante di decadimento sono stati eseguiti studi per capire se le oscillazioni annuali che in [17] vengono correlate alla distanza Terra-Sole fossero realmente derivanti dal decadimento in se oppure dovute a fattori ambientali, come temperatura, pressione e umidità che cambiano sensibilmente tra i mesi estivi e quelli invernali. Un' interessante analisi di Jenkins e altri [19] sulle eventuali influenze ambientali nei primi esperimenti citati nella sezione 1.3 mostra che in realtà, per il tipo di rivelatore utilizzato, le misure non possono subire errori sistematici che possano spiegare le osservazioni registrate. Nell'esperimento presso PTB[31], l'osservazione svolta sul ^{226}Ra è avvenuta con una camera a ionizzazione in modalità corrente, in uscita cioè si ha una corrente dovuta alla formazione di coppie elettrone-ione in seguito all'interazione della radiazione incidente (fotone) con il gas contenuto nella camera a ionizzazione (in questo caso argon). Si analizzano varie eventualità tra cui possibili fluttuazioni dovute a modificazioni nel gas della camera oppure variazioni del voltaggio tra catodo e anodo ma, come illustrato in [19], nessuna di queste eventualità pu spiegare le fluttuazioni osservate.

Lo stesso tipo di analisi è stata svolta per l'esperimento BNL, per il quale è stato usato un contatore proporzionale. Gli unici effetti che possono aver condizionato l'esito delle misure riguardano la temperatura e umidità. Questi dati sono stati raccolti solo negli ultimi mesi di misura [3] dagli sperimentatori. Tuttavia, dai dati raccolti presso la stessa struttura nella quale si è svolto l'esperimento si può escludere che le fluttuazioni osservate possano derivare da effetti di questo tipo.

Fatta questa premessa, se possiamo escludere che le oscillazioni derivino da errori dovuti alle condizioni ambientali nelle quali si svolge l'esperimento, resta una serie di correlazioni mostrate nei vari lavori, che dipendono essenzialmente dall'attività solare e dalla posizione della Terra rispetto al Sole.

Una importante correlazione sembra essere quella relativa ai flares solari, notata in seguito all'osservazione da parte di Jenkins e Fischbach di una netta diminuzione nell'attività del ^{54}Mn in concomitanza con il flare del 13 dicembre 2006 [16]. Di seguito un breve approfondimento su questi particolari eventi.

I flares solari

I flares solari sono esplosioni che avvengono sulla superficie del Sole e causano l'invio di energia, luce e particelle ad elevata velocità nello spazio. Generalmente i flares sono associati a tempeste magnetiche e il numero di questi eventi aumenta approssimativamente ogni 11 anni. I flares sono classificati in base alla loro entità: quelli più importanti sono noti come "X-class flares", mentre quelli di minore rilevanza sono detti "A-class", seguiti da B, C, M e X. La proporzione tra i vari livelli è simile alla scala Richter usata per i terremoti: ogni livello vale 10 volte quello precedente. Inoltre per ogni lettera esiste una scala più piccola che va da 1 a 9.

I flares classificati dalla lettera C in giù sono troppo poco potenti per influenzare la Terra, quelli di tipo M possono avere qualche effetto ma non eccessivamente rilevante.

Per quanto riguarda i flares di tipo X, sono stati registrati eventi classificati anche molto oltre gli X9, come, per esempio, il più importante registrato finora con la tecnologia moderna e risalente al 2003 (Fig. 3.1). Questo flare è stato classificato come X28, poichè si è rivelato così potente da eccedere il fondo scala dei sensori.

Se questi flares sono diretti verso la Terra possono influenzare per esempio l'attività dei satelliti. Questi eventi sono infatti costantemente monitorati.

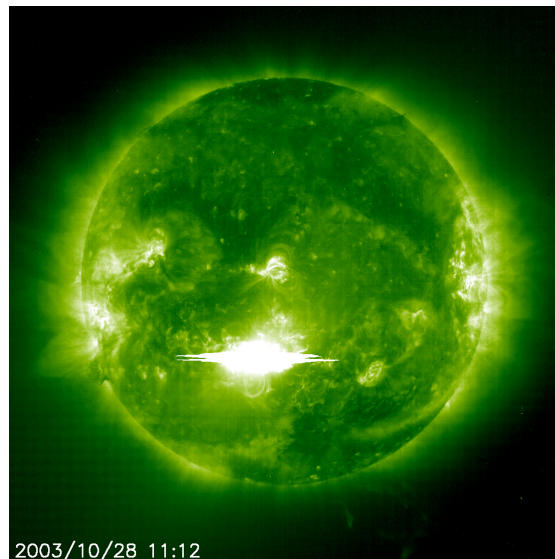


Figura 3.1: The Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)spacecraft captured this image of a solar flare as it erupted from the sun early on Tuesday, October 28, 2003. Image Credit: ESA and NASA-SOHO

Lavori successivi rispetto alla fluttuazione osservata dal gruppo di Jenkins hanno commentato questi dati notando che, diversamente dalle altre possibili correlazioni ricercate, un'eventuale correlazione di questo tipo ha caratteristiche precise che tendono ad escludere fluttuazioni dovute ad errori sistematici di altra natura. In particolare, poichè la durata media di un flare può variare da ore a qualche giorno al massimo, si possono escludere fattori ambientali come umidità, temperatura e pressione come responsabili delle fluttuazioni osservate [14], [19]. Messa da parte questa ipotesi, resta la possibilità che le fluttuazioni siano dovute a cause ambientali che riguardano per esempio l'incidenza di muoni o neutroni sul sistema di rivelazione. Questa eventualità è esclusa dagli autori [19] in quanto, per come è stato ideato il sistema di rivelazione, si acquisiscono fotoni di energia ben pre-

cisa, 834.8 keV, che derivano dal processo di cattura elettronica. Quindi risulta altamente improbabile, concludono gli autori, che fotoni di quella precisa energia siano acquisiti in seguito a fenomeni di altra natura.

La questione resta tuttavia controversa: i risultati del gruppo di Parkhomov sono in disaccordo con quelli di Jenkins [27] e l'autore conclude che la correlazione sia dubbia. Oppure il decadimento via cattura elettronica potrebbe risultare sensibile per qualche ragione non ancora identificata. Infatti i decadimenti studiati da Parkhomov riguardano solamente decadimenti β e α . Ciò che rende ancora più dubbia questa correlazione sono le osservazioni di Parkhomov avvenute a distanza dagli eventi di flare [27]. Tutti gli autori comunque concordano sulla necessità di svolgere altre misure.

L'altra principale correlazione osservata in [17] e poi ricercata successivamente da altri gruppi riguarda la distanza della Terra dal Sole, nell'ipotesi che le fluttuazioni siano causate da un meccanismo ancora ignoto originato dal Sole. In particolare, Jenkins riscontra una correlazione dei suoi dati con l'inverso del quadrato della distanza dal Sole. Definiamo a questo proposito la *fase*, ovvero la fluttuazione massima osservata, che coincide con un determinato periodo/giorno dell'anno. La fase di queste fluttuazioni rappresenta uno dei punti più dibattuti: infatti i gruppi che dopo Jenkins hanno cercato correlazioni simili per altri radionuclidi non hanno potuto riscontrare una coincidenza di fase, si vedano a tale proposito il lavoro di Norman e altri [25]. Se si prescinde dalla fase, però, si possono trovare in effetti delle oscillazioni dai dati di Norman, da cui l'idea di fare una ricerca che sia indipendente dalla fase. I motivi, illustrati in [26], sono due: le fasi identificate per il ^{36}Cl e per il ^{32}Si nei dati di Jenkins, ad esempio, differiscono tra loro, ma la ragione fondamentalmente risiede nel fatto che la natura di queste oscillazioni è ancora ignota, perciò non si può escludere a priori che la fase possa essere variabile.

3.2 Principi fisici delle variazioni osservate

A partire dalle osservazioni effettuate, alcuni gruppi si sono spinti in considerazioni di natura teorica che potrebbero dare spiegazioni plausibili alle fluttuazioni osservate.

Nel lavoro [14], Fischbach teorizza la possibile esistenza di generiche particelle provenienti dal Sole, che chiama "neutrellos", eventualmente identificabili con i neutrini, e che, per spiegare le osservazioni, dovrebbero avere determinate proprietà, tra cui la possibilità di passare indisturbati attraverso la superficie del Sole e della terra a velocità paragonabile a c e la proprietà di provenire da una regione più interna del Sole (questo spiegherebbe perchè la diminuzione del count rate del ^{54}Mn sia avvenuta circa 40 ore prima rispetto alla manifestazione del flare). Inoltre, la loro produzione dovrebbe avvenire in maniera asimmetrica, questo potrebbe spiegare perchè le oscillazioni osservate mostrano delle periodicità. L'autore inoltre considera la possibilità che i "neutrellos" possano corrispondere ai neutrini.

Altri gruppi [33] [13] giungono a conclusioni simili: i neutrini potrebbero essere buoni candidati, perchè rispecchiano le proprietà necessarie a spiegare le oscillazioni osservate. Resta però un problema cruciale: ad ora non sembra possibile

che i neutrini possano influenzare i decadimenti dei radioisotopi. L'unica eventualità che si potrebbe considerare a tale proposito è che i neutrini fungano da "trigger" per il decadimento. Ad ogni modo, un esperimento condotto da Meijer e altri esamina la possibile influenza di antineutrini sul decadimento del ^{54}Mn e del ^{22}Na sfruttando i periodi di accensione e spegnimento di un reattore. I risultati di questo lavoro [11] smentiscono l'ipotesi che gli antineutrini possano influenzare in qualche modo il decadimento beta.

Sicuramente, se vi è una difficoltà nel trovare una spiegazione plausibile per i decadimenti beta, la questione è ancora più complicata per i decadimenti alfa: non sono state registrate fluttuazioni significative, perciò se esiste un meccanismo che regola queste oscillazioni, probabilmente agisce diversamente sui due tipi di decadimento. Nonostante le varie lacune che presenta questa ipotesi, resta comunque quella più accreditata.

Per concludere, un'ultima ipotesi riguarda l'influenza di una possibile anisotropia dello spazio e l'esistenza di una ipotetica quinta forza che va ad influenzare tra tutto anche la costante di struttura fine, e quindi le costanti fondamentali [5]. L'ipotesi di anisotropia è sostenuta anche da Sturrock [32]. Anche in questo lavoro si cercano di capire le conseguenze di una ancora ignota radiazione prodotta in maniera asimmetrica e proveniente dal sole. In base a queste ipotesi gli autori concludono che possono esserci fasi permesse e fasi proibite, e possono notare che in base a questa "classificazione" le fluttuazioni che analizzano rientrano effettivamente nella prima categoria.

3.3 Implicazioni

È necessario premettere che gli effetti osservati sono molto rari, considerando peraltro i lunghi tempi di dimezzamento degli isotopi per i quali sono avvenute le osservazioni, la probabilità di riscontrare un effetto simile è dell'ordine di 10^{-4} [27].

Una ipotesi sulle possibili conseguenze di una legge non esponenziale di decadimento è illustrata da Aston, [4], che studia in particolare il comportamento del ^{14}C , basandosi sulla curva di calibrazione, necessaria per tenere conto della diversa concentrazione di carbonio nelle epoche passate. La calibrazione avviene per confronto con la dendrocronologia, ovvero la datazione fatta mediante lo studio degli anelli dei tronchi degli alberi. Per un periodo che va indietro fino a 3000 anni, i dati della dendrocronologia sono in buon accordo con la datazione eseguita col radiocarbonio. Per periodi precedenti c'è una discrepanza significativa del 15 %. La calibrazione viene fatta ipotizzando che la legge di decadimento segua un andamento esponenziale. Aston ritiene che la discrepanza riscontrata sia dovuta non solo a fattori atmosferici (una diversa concentrazione di carbonio in epoche passate), ma sostiene che vada presa in considerazione l'ipotesi che la legge sia non esponenziale. Una conseguenza diretta e notevole di ciò è che le datazioni eseguite con il radiocarbonio siano da correggere in questo senso perchè potrebbero essere state eseguite assumendo un'ipotesi sbagliata. Questo discorso potrebbe essere esteso ai radioisotopi con tempi di dimezzamento molto lunghi.

Un'altra conseguenza, più significativa, sarebbe la variazione di costanti fondamentali legate alla eventuale fluttuazione del decay rate Γ . Se è vera l'ipotesi per cui gli effetti di fluttuazione sono dovuti ad un campo che ha origine dal Sole, per cui la variazione del decay rate sarebbe legata al moto orbitale della Terra intorno al Sole[8], si avrebbe che:

$$\frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} = \sum_i \frac{\delta \log \Gamma}{\delta \log C_i} \Delta \log C_i \quad (3.3.0.1)$$

dove C_i è una costante. In particolare in [8] si considerano i casi per cui C_i è uguale ad α_{em} , costante di struttura fine e G_F costante di Fermi. Una variazione della costante di struttura fine avrebbe implicazioni notevoli, poichè dipende soltanto da costanti fondamentali. Infatti:

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (3.3.0.2)$$

Per un decadimento alfa la dipendenza da α_{em} è data dalla relazione 3.3.0.3 [8]

$$\Gamma \approx \Lambda(\alpha_{em}, v) e^{\frac{-4\pi Z\alpha_{em}c}{v}} \quad (3.3.0.3)$$

da cui si ricava la variazione del decay rate in relazione alla costante di struttura fine:

$$s = \frac{d\log\Gamma}{d\log\alpha_{em}} = 4\pi z \frac{c}{v} \alpha_{em} \left[\left(\frac{0.3 \text{ MeV}}{\Delta E} \right) f(A, Z) - 1 \right] \quad (3.3.0.4)$$

Per quanto riguarda il decadimento beta invece, la variazione della costante di decadimento in relazione ad α_{em} è data da:

$$s = \frac{d\log\Gamma}{d\log\alpha_{em}} = p \frac{d\log\Delta E}{d\log\alpha_{em}} \quad (3.3.0.5)$$

Il decay rate per il decadimento beta è inoltre proporzionale a G_F^2 , con una sensibilità nella variazione della costante di decadimento rispetto alla costante di Fermi che è data da:

$$s = \frac{d\log\Gamma}{d\log G_F} = 2 \quad (3.3.0.6)$$

Ad una eventuale oscillazione della costante di decadimento consegue una oscillazione della costante di struttura fine e della costante di Fermi come appena illustrato. Questo ha importanti ripercussioni sulle interazioni deboli ed elettromagnetiche, poichè sono queste costanti che ne determinano l'entità. Un eventuale riscontro, con nuove prove sperimentali, delle fluttuazioni osservate al di là della comprensione del fenomeno fisico che dà luogo a questi effetti, avrebbe quindi notevoli conseguenze.

Capitolo 4

Sviluppo di un apparato sperimentale per effettuare misure

4.1 Scelta del radioisotopo

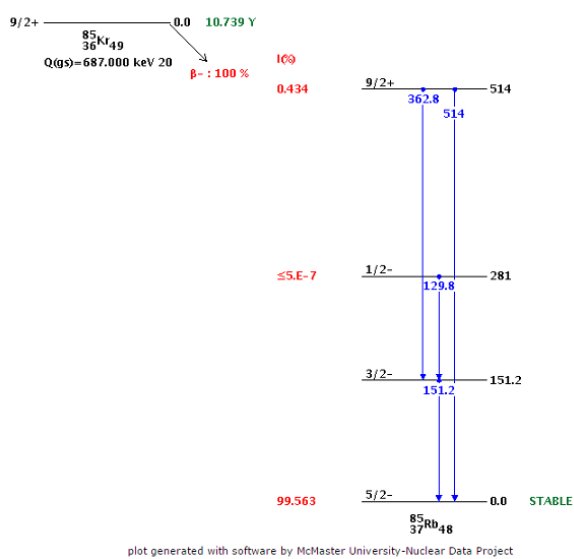
Le osservazioni principali sono state registrate su decadimenti beta, per questo motivo la scelta è ricaduta su un radioisotopo che decade secondo questa modalità. In particolare si utilizzano due radioisotopi, il ^{85}Kr e lo ^{90}Sr , due sorgenti beta, la prima gassosa e la seconda solida. La scelta della sorgente gassosa è motivata dal fatto che eventuali fluttuazioni potrebbero derivare da fenomeni locali, quindi per escludere questa ipotesi si sceglie un tipo di sorgente che può essere agitata per mescolarne gli atomi. Allo stesso tempo, una sorgente gassosa può essere più complicata da gestire per altri versi: l'eventualità di variazioni della massa della sorgente porterebbe a risultati falsati. Per ovviare a questa difficoltà si può utilizzare una seconda sorgente di confronto, in questo caso una sorgente solida che è, come anticipato, lo ^{90}Sr .

Si illustrano ora le principali caratteristiche di queste due sorgenti.

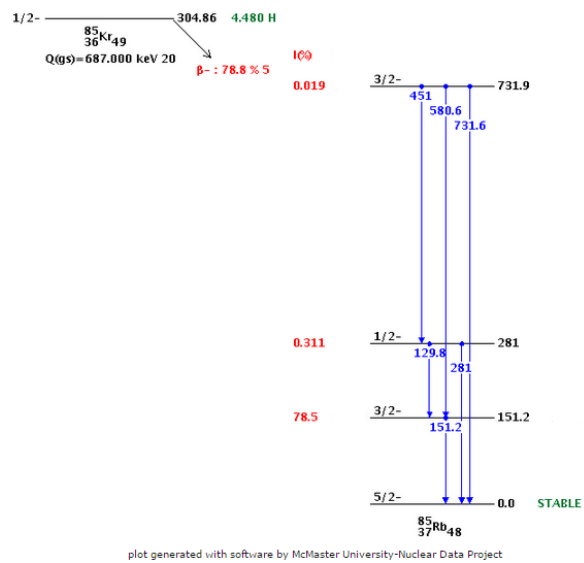
· ^{85}Kr

Il Krypton è un gas nobile, incolore, ed è presente in natura sotto forma di vari isotopi, il più abbondante dei quali è il ^{84}Kr . L'isotopo che ci si propone di utilizzare è sintetico, ha una vita media di 10.756y e attività specifica di $1.45 \cdot 10^{13} \text{Bq/g}$. La modalità con cui decade è principalmente via β^- in ^{84}Rb , l'elettrone prodotto dal decadimento ha un'energia massima di 0.687 MeV. La probabilità che invece il decadimento avvenga per emissione di un gamma è molto piccola e darebbe come prodotto un fotone di energia 514 keV.

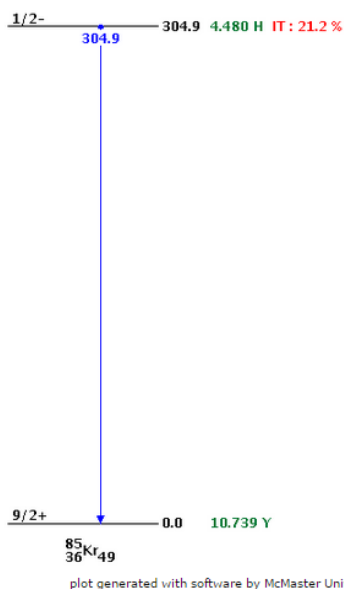
Gli schemi di decadimento sono rappresentati nella figura 4.1:



(a) Decadimento β^-



(b) Decadimento β^- del Kr metastabile



(c) Conversione interna

Figura 4.1: Schemi di decadimento del ^{85}Kr

In figura 4.2 è invece mostrato lo spettro per il decadimento β^- schematizzato in 4.1b realizzato da dati simulati con codice di Monte Carlo.

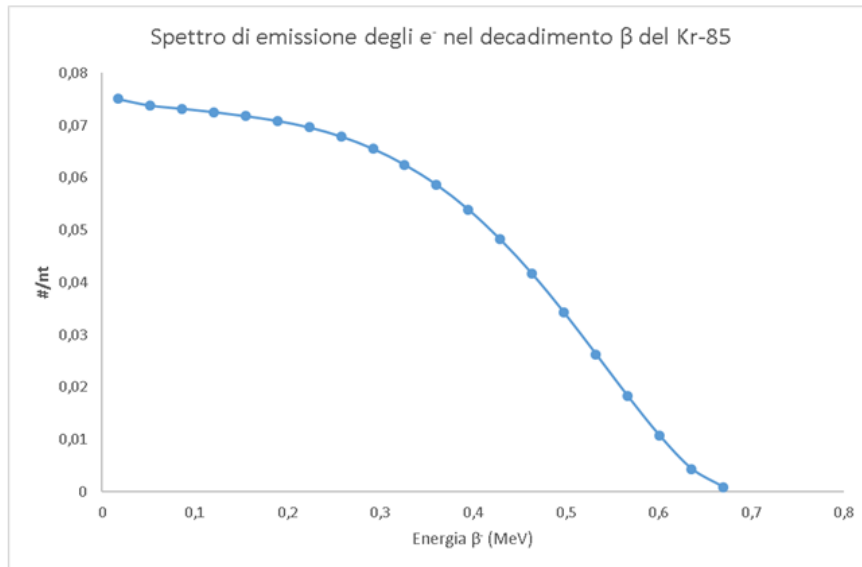


Figura 4.2: Spettro del ^{85}Kr

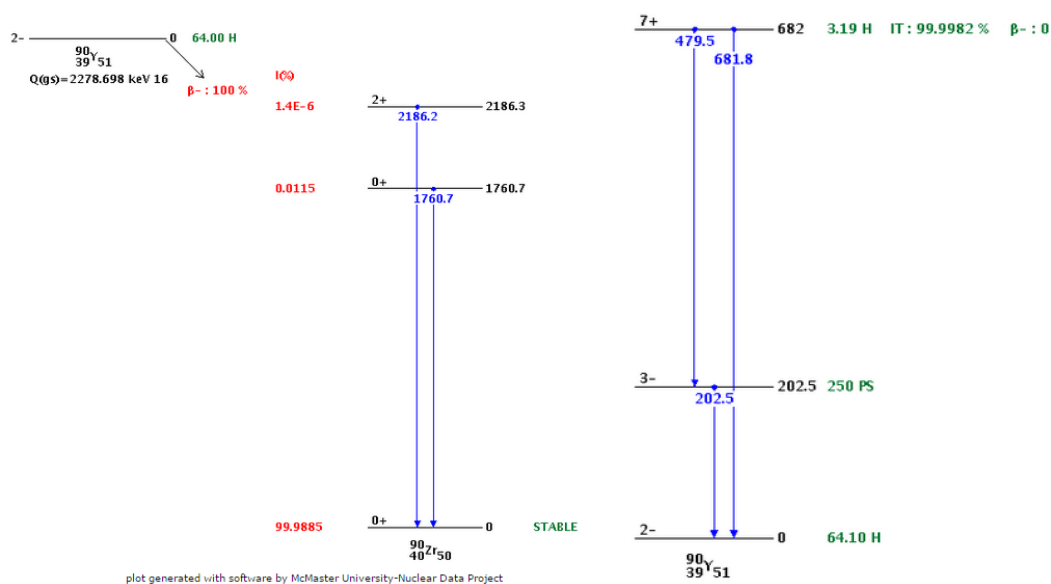
· $\underline{{}^{90}\text{Sr}/{}^{90}\text{Y}}$

Il radioisotopo solido che utilizziamo come riferimento è lo Stronzio in equilibrio secolare con l'Yttrio.

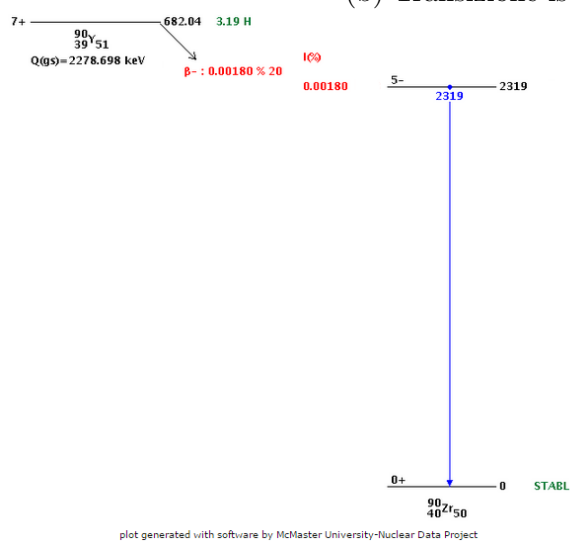
L'equilibrio secolare tra due isotopi generici padre (A) e figlio (B) si realizza quando l'emivita del radionuclide B è molto più breve rispetto a quella del radionuclide A. Questo comporta che il tasso di decadimento di A, cioè il tasso di produzione di B, sia circa costante, perchè l'emivita di A molto lunga. La condizione di equilibrio si ha quando il numero di atomi di B che decade per unità di tempo diventa uguale al numero prodotto per unità di tempo, e il numero di atomi di B risulta quindi costante.

Nel caso particolare discusso qui, il nucleo padre è lo ^{90}Sr e il nucleo figlio ^{90}Y . Lo Stronzio è un metallo alcalino solido, che in natura presenta cinque isotopi, il più abbondante è lo ^{88}Sr . Lo ^{90}Sr si trova in quantità molto ridotte rispetto agli altri isotopi, ha un tempo di dimezzamento di 28.9y e decade esclusivamente via β^- . L'elettrone prodotto del decadimento ha un'energia massima di 0.546 MeV. L'Yttrio, prodotto del decadimento dello Stronzio, è un metallo di transizione, solido, di aspetto bianco/argentato. Esiste in natura in un'unica forma isotopica stabile con cinquanta neutroni: ^{89}Y . L' ^{90}Y di cui ci si occupa qui ha un tempo di dimezzamento di 2.67 giorni (molto inferiore rispetto allo Stronzio, come anticipato questa è una condizione necessaria perchè i due isotopi si trovino in equilibrio secolare). Ci sono due vie di decadimento in questo caso: β^- e per transizione isomerica. Nel primo caso l'energia massima dell'elettrone prodotto del decadimento è di 2.28 MeV, invece l'energia del fotone emesso via decadimento gamma è di 1.20 MeV.

L'attività specifica dei due isotopi in equilibrio secolare è di $5.21 \cdot 10^{12} Bq/g$.
Nelle figure 4.4, 4.3 e 4.5 sono riportati gli schemi di decadimento e lo spettro per i due radioisotopi.



(a) Decadimento β^-



(c) Decadimento β^- del Y metastabile

Figura 4.3: Schemi di decadimento del ^{90}Y

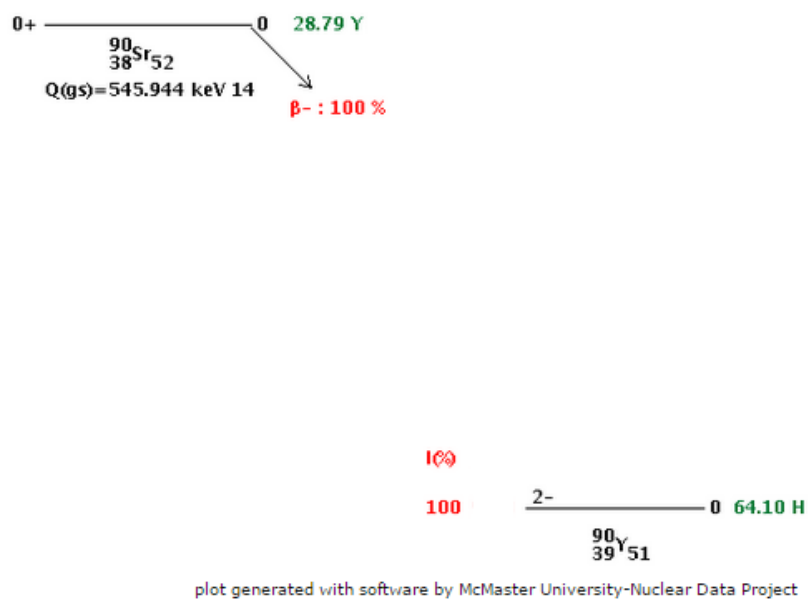


Figura 4.4: Schema di decadimento dello ^{90}Sr

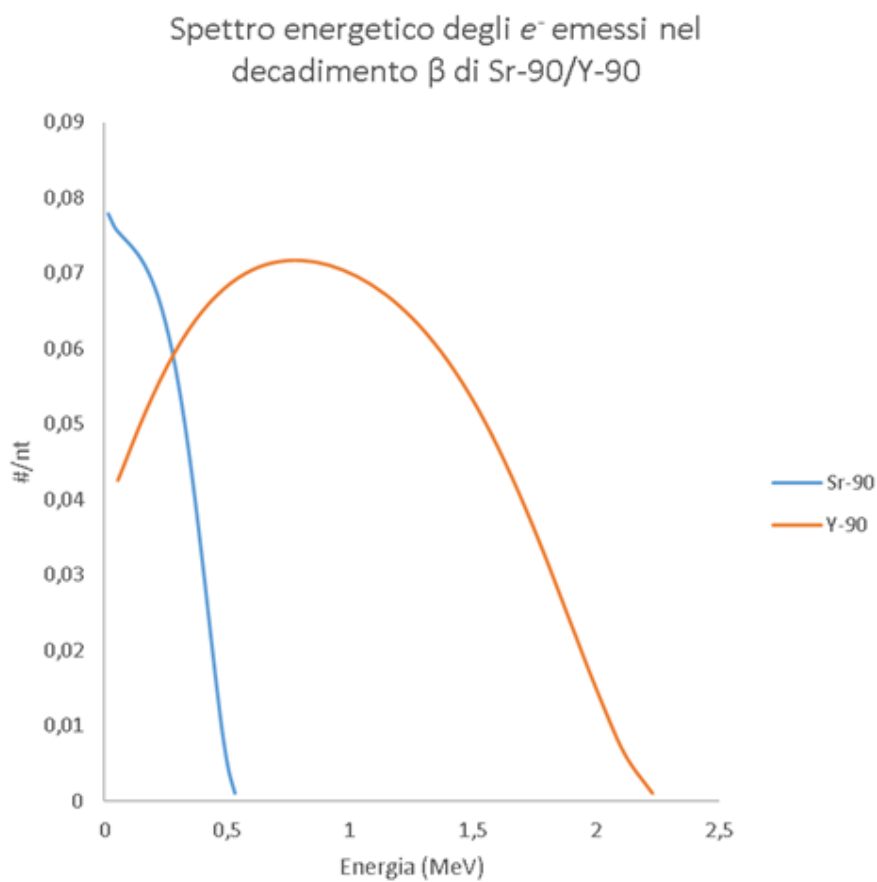


Figura 4.5: Schema di decadimento dello $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

Oltre ai motivi già discussi, ci sono altri fattori non trascurabili che rendono i due isotopi adatti agli scopi prefissati:

- I tempi di dimezzamento sono "accettabili", non troppo brevi (le misure risulterebbero meno precise) e non troppo lunghi (l'esperimento dovrebbe protrarsi per un tempo eccessivamente prolungato).
- Le sorgenti hanno una intensa densità di radiazione (Bq/g). Questa proprietà è importante perchè servono misure che si distinguano dal rumore di fondo per almeno cinque o sei deviazioni standard al fine di avere serie di dati più accurate.

4.2 Descrizione e schema dell'apparato sperimentale

Lo schema a blocchi dell'apparato che ci si propone di realizzare è rappresentato nella figura 4.6.

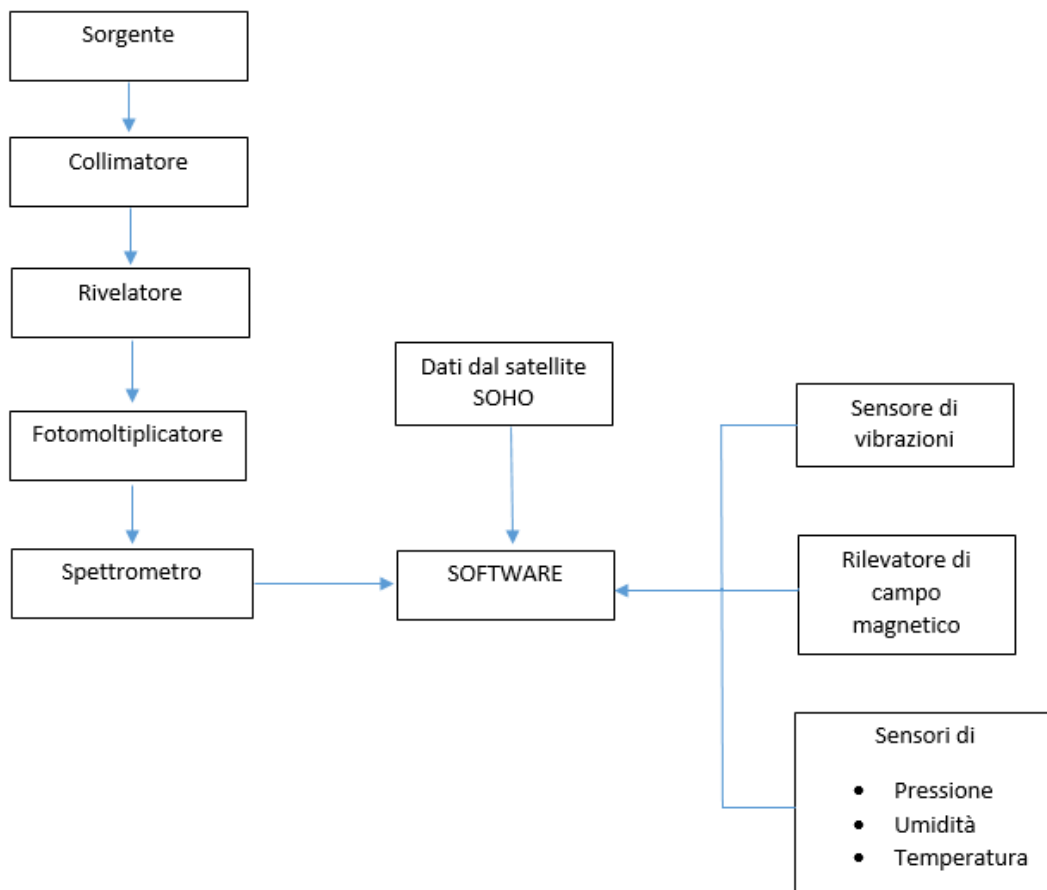


Figura 4.6: Schema a blocchi dell'apparato sperimentale

Si illustrano ora più in dettaglio le singole parti dello schema.

La sorgente, scelta con le modalità discusse nel paragrafo 4.1 è posizionata su una guida che può far scorrere orizzontalmente il campione e condurlo all'interno di

una cavità di piombo, dove si trova il rivelatore. Questo accorgimento può rendere più agevole la misura del rumore di fondo, perchè basterà estrarre la sorgente dalla cavità e poi inserirla nuovamente all'interno quando si acquisiscono i dati. Ci sono però alcuni altri accorgimenti da adottare: i decadimenti dovuti alla sorgente sono di tipo β^- , e potrebbero verificarsi fenomeni di annichilazione con dei β^+ derivanti da decadimenti del Piombo usato per schermare. Questo è un problema rilevante soprattutto perchè il picco dovuto all'annichilazione è molto vicino energeticamente al picco che vogliamo misurare. Per evitare questo inconveniente si può utilizzare un collimatore graduale, costituito cioè da vari strati di materiali differenti, in modo tale che ogni strato possa assorbire la radiazione non bloccata dallo strato precedente. In questo caso si potrebbero utilizzare tre strati: Piombo, Rame e Alluminio.

Tutta la strumentazione va posizionata su un mobile molto pesante che poggia direttamente sul pavimento di cemento dell'edificio per evitare il più possibile le vibrazioni. Il supporto per il mobile è costituito da tre sostegni appositi che smorzano le vibrazioni. Un sostegno di questo tipo è mostrato nella figura 4.7



Immagine rappresentativa della gamma

Figura 4.7: Esempio di sostegno per smorzare le vibrazioni

I piedini di sostegno sono solo tre per rendere il tutto più stabile.

Veniamo ora alla scelta del tipo di rivelatore, facendo una premessa su ciò che si intende misurare. Il rivelatore dovrebbe misurare il fotone γ di riassetamento emesso dal nucleo in seguito all'elettrone del decadimento beta vero e proprio. A questo proposito, l'idea è quella di fare una spettrometria gamma in modo tale da vedere anche le possibili sorgenti esterne di radiazione eventualmente non schermate. Dallo spettro si dovrà poi selezionare il picco di interesse e da questo si può ottenere il numero di conteggi, proporzionale all'area sottesa alla gaussiana di best fit del picco designato. Questo calcolo si può eseguire analiticamente dopo aver sottratto il fondo dal nostro spettro.

Il rivelatore ideale per i nostri scopi è, come accennato in precedenza, uno strumento che possa essere stabile nel tempo e che abbia una buona risoluzione energetica. Queste caratteristiche si trovano nei rivelatori al Germanio Iperpuro (HPGe).

Questi rivelatori però presentano una problematica non trascurabile: devono essere immersi in azoto liquido per raggiungere una temperatura adeguata al loro corretto funzionamento. Questa condizione è eccessivamente complicata da soddisfare nel caso specifico discusso qui.

Un buon compromesso si trova in un tipo di rivelatore a scintillazione, un rivelatore al Tri-bromuro di Lantanio attivato al Cerio ($\text{LaBr}_3 : \text{Ce}$). Il modello reperibile in commercio ha una forma cilindrica con diametro e altezza di 1".

La risoluzione energetica di questo oggetto è la migliore tra quelle degli scintillatori e in questo senso si colloca a metà strada tra scintillatori e rivelatori di stato solido come gli HPGe accennati in precedenza. In particolare, per energie intorno ai 600 keV la risoluzione è del 3%, e per energie intorno ai 100 keV è del 6.5%.

	Density (g/cm ³)	Z eff.	Light yield (ph/MeV)	Decay time (ns)	Refr. index	$\Delta E/E$ (PMT) *	$\lambda_{\text{Emiss max}}$ (nm)
Nal(Tl)	3.67	51.0	41,000	230	1.85	9 % @140keV	410
CsI(Tl)	4.51	52.0	66,000	630	1.80	14 % @140keV	565
YAP	5.50	36.0	21,000	27	1.95	20 % @140keV	350
LaCl ₃ (Ce)	3.86	49.5	46,000	27 (65%)	1.90	8 % @140keV 4 % @511keV	350
LaBr₃(Ce)	5.07	47.4	63,000	16 (97%)	1.90	7 % @140 keV 4 % @511 keV	380
LuI ₃ (Ce)	5.60	60	90,000	30	-	11 % @662keV	472 535
BGO	7.1	83	9,000	300	2.15	10 % @511 keV	480
LSO	7.4	66	30,000	40	1.82	10 % @511 keV	420
LYSO	7.1	65	25,000	42	1.82	11 % @511 keV	420

Figura 4.8: Specifiche del rivelatore $\text{LaBr}_3 : \text{Ce}$

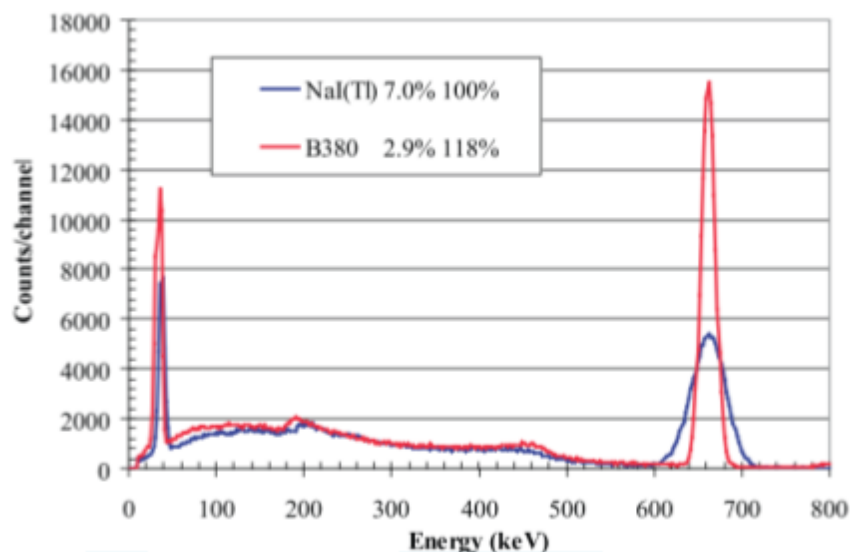


Figura 4.9: Spettro del ^{137}Cs ottenuto con uno scintillatore $\text{LaBr}_3 : \text{Ce}$ confrontato con lo spettro ottenuto da uno scintillatore NaI(Tl)

Un parte del rumore di fondo proviene dal rivelatore stesso a causa del decadimento dell'isotopo del Lantanio ^{138}La come mostrato nella figura 4.10.

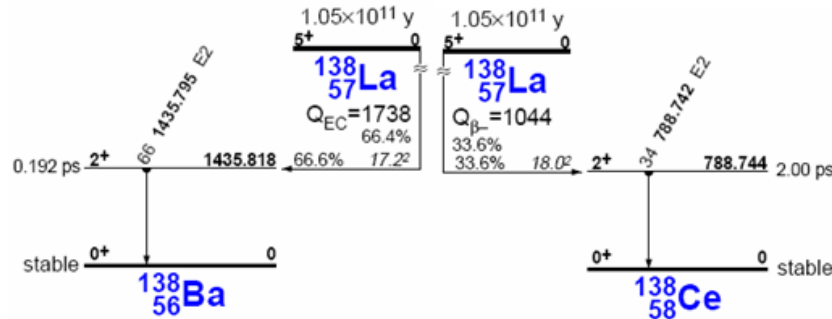


Figura 4.10: Schema di decadimento del ^{138}La

Oltre al Lantanio, una componente di rumore è originata anche dal decadimento dell'Attinio, ^{227}Ac , che deriva dalla catena di decadimento dell'Uranio e contamina, anche se in piccola parte, il Lantanio, contribuendo ad accrescere il rumore di fondo. Questi decadimenti intrinseci però non "disturbano" la raccolta dei dati, perchè le righe che compaiono nello spettro per questo motivo sono ben definite in energia e possono essere individuate. Inoltre, l'attività specifica di questi decadimenti è di circa 50 Bq/minuto, nettamente inferiore rispetto a quella delle sorgenti che si vogliono misurare.

Concludendo sul rivelatore si mostra l'efficienza di assorbimento per raggi gamma e raggi X in funzione dello spessore del cristallo:

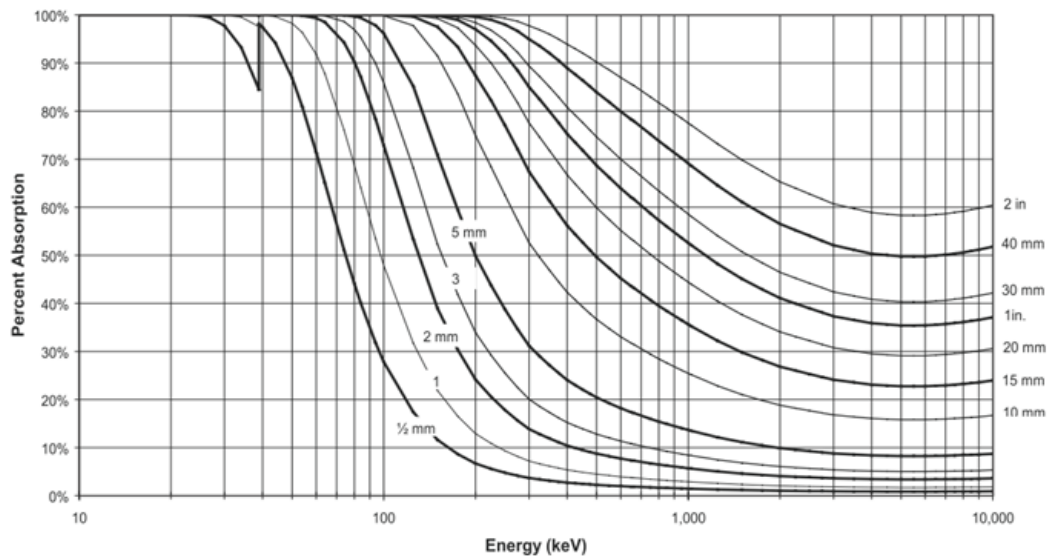


Figura 4.11: Efficienza del LaBr_3 in funzione dello spessore

Come illustrato nello schema di figura 4.6, il rivelatore è collegato ad un fotomoltiplicatore. In commercio si possono trovare vari modelli distribuiti da Hamamatsu tra cui quelli della serie R11265U e H11934 rappresentati in figura 4.12.



Figura 4.12: PSPMT UB H8500

L'accoppiamento di questo fotomoltiplicatore con il tipo di rivelatore descritto in precedenza può dare una buona risoluzione, come mostrato nella figura 4.13

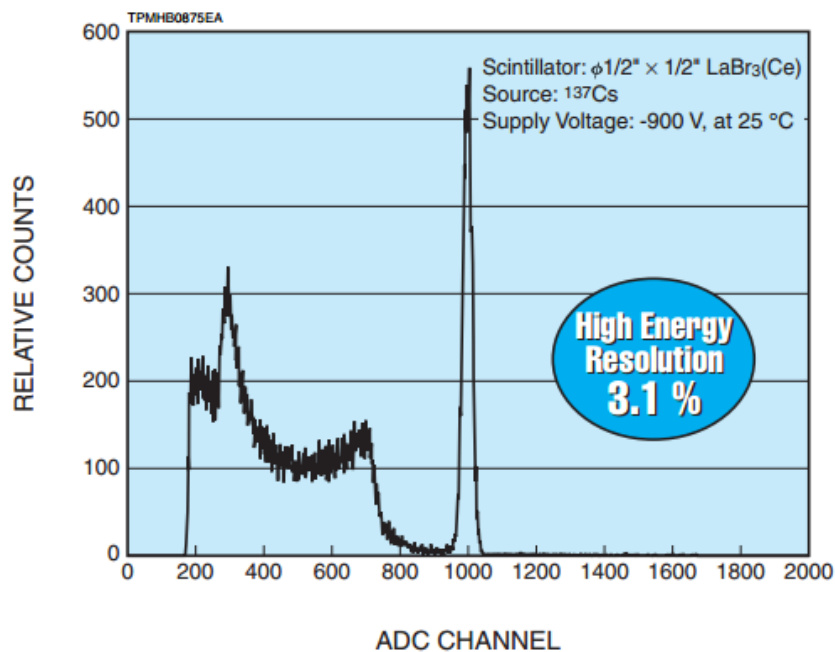


Figura 4.13: Risoluzione dei PMT accoppiato con lo scintillatore LaBr_3

4.3 Discussione

Si discutono in questo paragrafo conclusivo alcune osservazioni e problematiche che potrebbero presentarsi nello svolgimento del lavoro proposto.

- Analisi dei dati raccolti

La raccolta dati dovrà protrarsi per un periodo di tempo piuttosto lungo (svariati mesi). È quindi necessario che il software sia sviluppato in modo tale da acquisire in autonomia i dati a determinati intervalli di tempo, oltre a raccogliere in rete i dati dal satellite per tabulare le misure sul flusso di raggi X provenienti dal Sole e verificare eventuali correlazioni legate all'attività solare.

- Fotoni di riassetamento

Ciò che si va a misurare con il rivelatore sono i fotoni di riassetamento che seguono l'emissione dell'elettrone da parte del nucleo. Ci si potrebbe chiedere se le eventuali fluttuazioni non siano legate a questo fenomeno, quindi ad un gamma, piuttosto che agli elettroni, e quindi alla natura del decadimento beta. Si può pensare a questo punto di eseguire una misura direttamente sugli elettroni per semplificare le cose. Il fatto però che il decadimento beta abbia uno spettro continuo rende le cose più complicate, infatti il rivelatore che si deve utilizzare, che potrebbe essere ad esempio un rivelatore al Silicio, deve misurare conteggi su una banda piuttosto ampia, in questo modo però il rumore di fondo aumenta ed è difficile da scartare. Nella regione dello spettro con basse energie, la situazione diventa ancora più critica perché il segnale si distingue ben poco dal rumore, inoltre è proprio questa la zona dello spettro che ci interessa misurare con precisione.

Conclusioni

Dall'analisi degli articoli presenti nella letteratura recente sembrerebbe emergere che le fluttuazioni si riscontrino quasi esclusivamente in processi descritti da decadimenti beta. Studi sui decadimenti alfa non hanno portato ad alcun risultato consistente con le prime osservazioni e le misure su eventuali fluttuazioni nei processi gamma, poichè correlati ad un riassetto energetico del nucleo che ha subito decadimento, potrebbero essere ricondotti ad uno delle altre due forme di decadimento.

Le ipotesi sulle cause delle fluttuazioni osservate sono varie, per quanto alcuni autori siano indirizzati a ricondurle all'attività solare, in particolare in seguito allo studio di correlazioni tra le fluttuazioni e la distanza Terra-Sole e i flares solari.

La necessità di ampliare la collezione di misure raccolte finora è evidente, sia per verificare che le fluttuazioni siano effettivamente legate al fenomeno di decadimento, sia per cercare di capire a livello teorico quale potrebbe essere la causa di tali variazioni, al di là delle ipotesi di correlazione.

Con l'esperimento proposto ci si pone proprio questo obiettivo, ricercando le fluttuazioni su un tipo di decadimento (decadimento beta) per il quale sembrano già essere state osservate anomalie. Nel tentativo di comprendere l'eventuale esistenza del fenomeno, si opterà per l'utilizzo di 2 tipi di sorgenti particolari (Kriptone 85 e Stronzio 90), con lo scopo di valutare se, oltre all'eventuale fenomeno, ci possano anche essere delle correlazioni con lo stato di aggregazione chimica della sorgente: gas (incapsulato in metallo) nel caso del Kr rispetto a solido (nel caso dello Sr). È evidente che esperimenti di questo genere richiedano non solo tempi molto lunghi, per contare su una necessaria statistica di misura, ma anche una programmazione iniziale che permetta di valutare, con ragionevolezza, le incertezze di misura presenti nel sistema di monitoraggio e gli eventuali upgrade che ne consentano una riduzione a valori tali per cui nella misura finale non siano presenti fluttuazioni che possano inficiare la risposta. In questo senso sarà quindi essenziale lo sviluppo di un sistema di software che raccolga periodicamente e registri:

- I dati del rivelatore, eseguendo le prime operazioni di calcolo (stripping del fondo, analisi del picco, calcolo dell'attività residua del nuclide, confronto con il valore di predizione teorico)
- Esegua una correlazione con dati raccolti in rete dal satellite SOHO e con quelli sulle condizioni ambientali al fine di valutare se, qualora si presentasse una discontinuità, questa fosse derivabile/correlabile o altro ad eventi esterni.

Sarà quindi necessario sviluppare un sistema di misura complesso, che non solo disponga di un misuratore di radiazione, ma contempli fin dall'inizio anche una sequenza di sensori e possa direttamente connettersi alla rete per scaricare e correlare dati solari. I dati così tabulati potranno essere analizzati in un futuro per contribuire a rendere più chiaro il quadro della situazione attuale.

Bibliografia

- [1] http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/X-class-flares.html#.Vdt4dPntmko.
- [2] T. Ferbel A. Das. *Introduction to nuclear and particle physics, second edition*. World Scientific, 2003.
- [3] D.E. Alburger, G. Harbottle, and E.F. Norton. Half-life of ^{32}Si . *Earth and Planetary Science Letters*, 78(23):168 – 176, 1986.
- [4] Philip J Aston. Is radioactive decay really exponential? *EPL (Europhysics Letters)*, 97(5):52001, 2012.
- [5] Yu A Baurov and IF Malov. Variations of decay rates of radio-active elements and their connections with global anisotropy of physical space. *arXiv preprint arXiv:1001.5383*, 2010.
- [6] E Bellotti, C Broggin, G Di Carlo, M Laubenstein, and R Menegazzo. Search for time dependence of the ^{137}Cs decay constant. *Physics Letters B*, 710(1):114–117, 2012.
- [7] E Bellotti, C Broggin, G Di Carlo, M Laubenstein, and R Menegazzo. Search for correlations between solar flares and decay rate of radioactive nuclei. *Physics Letters B*, 720(1):116–119, 2013.
- [8] E Bellotti, C Broggin, G Di Carlo, M Laubenstein, R Menegazzo, and M Pietroni. Search for time modulations in the decay rate of ^{40}K and ^{232}Th . *Astroparticle Physics*, 61:82–87, 2015.
- [9] Peter S. Cooper. Searching for modifications to the exponential radioactive decay law with the cassini spacecraft. *Astroparticle Physics*, 31(4):267 – 269, 2009.
- [10] Saint Gobain Crystal. Brilliance tm380 scintillation material. *Technical data sheet*, 2007.
- [11] RJ De Meijer, M Blaauw, and FD Smit. No evidence for antineutrinos significantly influencing exponential β^+ decay. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(2):320–326, 2011.
- [12] R Eisberg and R Resnick. *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids and Nuclei*. Wiley: New York, 1974.

- [13] Falkenberg. *Apeiron*, 8:32–45, 2001.
- [14] Ephraim Fischbach, Jere H Jenkins, and Peter A Sturrock. Evidence for time-varying nuclear decay rates: Experimental results and their implications for new physics. *arXiv preprint arXiv:1106.1470*, 2011.
- [15] P. L. Rossi G. Baldazzi. Rivelatori della radiazione ionizzante e loro impiego nella strumentazione medicale.
- [16] Jere H Jenkins and Ephraim Fischbach. Perturbation of nuclear decay rates during the solar flare of 2006 december 13. *Astroparticle Physics*, 31(6):407–411, 2009.
- [17] Jere H. Jenkins, Ephraim Fischbach, John B. Buncher, John T. Gruenwald, Dennis E. Krause, and Joshua J. Mattes. Evidence of correlations between nuclear decay rates and earthsun distance. *Astroparticle Physics*, 32(1):42 – 46, 2009.
- [18] Jere H. Jenkins, Kevin R. Herminghuysen, Thomas E. Blue, Ephraim Fischbach, Daniel Javorsek II, Andrew C. Kauffman, Daniel W. Mundy, Peter A. Sturrock, and Joseph W. Talnagi. Additional experimental evidence for a solar influence on nuclear decay rates. *Astroparticle Physics*, 37:81 – 88, 2012.
- [19] Jere H Jenkins, Daniel W Mundy, and Ephraim Fischbach. Analysis of environmental influences in nuclear half-life measurements exhibiting time-dependent decay rates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 620(2):332–342, 2010.
- [20] Karsten Kossert and Ole J Nähle. Long-term measurements of ^{36}Cl to investigate potential solar influence on the decay rate. *Astroparticle Physics*, 55:33–36, 2014.
- [21] Karsten Kossert and Ole J Nähle. Disproof of solar influence on the decay rates of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. *Astroparticle Physics*, 69:18–23, 2015.
- [22] K.S. Krane. *Introductory nuclear physics*. John Wiley and Sons Inc., New York, NY, Jan 1987.
- [23] Mario Marengo. *La fisica in medicina nucleare*. Pàtron, 2001.
- [24] E. B. Norman, E. Browne, Y. D. Chan, I. D. Goldman, R.-M. Larimer, K. T. Lesko, M. Nelson, F. E. Wietfeldt, and I. Zlmen. Half-life of ^{44}Ti . *Phys. Rev. C*, 57:2010–2016, Apr 1998.
- [25] Eric B Norman, Edgardo Browne, Howard A Shugart, Tenzing H Joshi, and Richard B Firestone. Evidence against correlations between nuclear decay rates and earth–sun distance. *Astroparticle Physics*, 31(2):135–137, 2009.

- [26] Daniel O’Keefe, Brittany L Morreale, Robert H Lee, John B Buncher, JH Jenkins, Ephraim Fischbach, T Gruenwald, D Javorsek II, and Peter A Sturrock. Spectral content of $^{22}\text{Na}/^{44}\text{Ti}$ decay data: implications for a solar influence. *Astrophysics and Space Science*, 344(2):297–303, 2013.
- [27] AG Parkhomov. Effect of radioactivity decrease. is there a link with solar flares? *arXiv preprint arXiv:1006.2295*, 2010.
- [28] AG Parkhomov. Researches of alpha and beta radioactivity at long-term observations. *arXiv preprint arXiv:1004.1761*, 2010.
- [29] GA Rech, E Browne, ID Goldman, FJ Schima, and EB Norman. Half-life of the 6.3-keV isomer in ^{121}Sn . *Physical Review C*, 65(5):057302, 2002.
- [30] H Schrader. Half-life measurements of long-lived radionuclides new data analysis and systematic effects. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(7):1583–1590, 2010.
- [31] Helmut Siegert, Heinrich Schrader, and Ulrich Schtzig. Half-life measurements of europium radionuclides and the long-term stability of detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 49(911):1397 – 1401, 1998.
- [32] Peter A Sturrock, John B Buncher, Ephraim Fischbach, JH Jenkins, Joshua J Mattes, et al. Concerning the phases of the annual variations of nuclear decay rates. *The Astrophysical Journal*, 737(2):65, 2011.
- [33] Peter A Sturrock, Gideon Steinitz, Ephraim Fischbach, D Javorsek, and Jerre H Jenkins. Analysis of gamma radiation from a radon source: indications of a solar influence. *Astroparticle Physics*, 36(1):18–25, 2012.
- [34] D.P. Veprev and V.I. Muromtsev. Evidence of solar influence on the tritium decay rate. *Astroparticle Physics*, 36(1):26 – 30, 2012.